

Thèse

**Présentée pour obtenir le grade de docteur de l'Université
Toulouse III - Paul Sabatier (UFR MIG)**

Spécialité : Informatique de l'Image

David PETIT

Extraction du « 3D » par interférométrie radar à haute résolution

Laboratoire : Traitement et Compréhension d'Images (TCI)
 Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT)
Directeur de recherche : **Jean-Denis DUROU**

Collaborations :

Centre National d'Études Spatiales



Frédéric Adragna

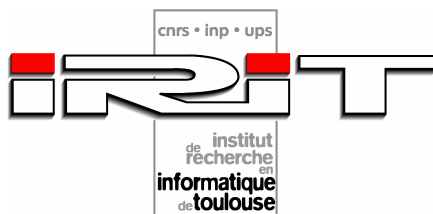
Communication & Systèmes



Jacques Coves

Soutenue le : le 12 janvier 2004

Jury :	M. Patrice Dalle	(Professeur UPS, Toulouse),	Président
	M. Henri Maître	(Professeur ENST, Paris),	Rapporteur
	M. Mihaï Datcu	(Professeur DLR, Oberpfaffenhofen, Allemagne),	Rapporteur
	M. Jean-Denis Durou	(Maître de conférence UPS, Toulouse),	Examineur
	M. Frédéric Adragna	(Ingénieur CNES, Toulouse),	Examineur
	M. Xavier Descombes	(Chargé de recherche INRIA, Sophia Antipolis),	Examineur
	Mme Anne Chanié	(Ingénieur CS, Toulouse),	Membre invité



Thèse

**Présentée pour obtenir le grade de docteur de l'Université
Toulouse III - Paul Sabatier (UFR MIG)**

Spécialité : Informatique de l'Image

David PETIT

Extraction du « 3D » par interférométrie radar à haute résolution

Laboratoire : Traitement et Compréhension d'Images (TCI)
 Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT)
Directeur de recherche : **Jean-Denis DUROU**

Collaborations :

Centre National d'Études Spatiales



Frédéric Adragna

Communication & Systèmes



Jacques Coves

Soutenue le : le 12 janvier 2004

Jury :	M. Patrice Dalle	(Professeur UPS, Toulouse),	Président
	M. Henri Maître	(Professeur ENST, Paris),	Rapporteur
	M. Mihaï Datcu	(Professeur DLR, Oberpfaffenhofen, Allemagne),	Rapporteur
	M. Jean-Denis Durou	(Maître de conférence UPS, Toulouse),	Examineur
	M. Frédéric Adragna	(Ingénieur CNES, Toulouse),	Examineur
	M. Xavier Descombes	(Chargé de recherche INRIA, Sophia Antipolis),	Examineur
	Mme Anne Chanié	(Ingénieur CS, Toulouse),	Membre invité

AUTEUR : David PETIT

TITRE : Extraction du « 3D » par interférométrie radar à haute résolution

DIRECTEUR DE THÈSE : Jean-Denis DUROU

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : 12 Janvier 2004 IRIT (Toulouse)

RÉSUMÉ :

Depuis quelques années, l'interférométrie radar a largement démontré son aptitude à recréer des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Cependant, son usage reste délicat aux hautes résolutions, notamment en milieu urbain. En effet, les caractéristiques géométriques d'acquisition et les propriétés de l'onde radar créent des ambiguïtés dans le signal interférométrique.

Dans un premier temps, une approche par simulation a donc été retenue, afin d'étudier l'impact des phénomènes mis en jeu, et de tester les techniques susceptibles de lever les ambiguïtés. Ainsi, les travaux sur la haute résolution radar ont mis en évidence des cas de corrélation spatiale de la phase sur des données réelles et simulées. Une proposition de modélisation du phénomène a été effectuée, et nous en avons montré les implications dans le cadre des traitements interférométriques. Nous avons ensuite étudié la possibilité d'un traitement optimal des zones de repliement pour la reconstruction du 3D sur des données simulées, grâce à des techniques de filtrage fréquentiel. Enfin, nous avons souligné l'intérêt d'une reconstruction adaptée à l'objet traité, grâce à une classification floue obtenue à partir de l'ensemble des informations extraites de l'image.

MOTS-CLÉS :

3D	SAR	Interférométrie	Haute résolution
Repliement	MNT	Logique floue	Urbain

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE :

Informatique de l'Image

INTITULÉ ET ADRESSE DE L'UFR OU DU LABORATOIRE :

Université de Toulouse III – Paul Sabatier,

118 route de Narbonne 31 062 Toulouse Cedex 4

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma gratitude envers les professeurs Henri Maître et Mihai Datcu pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse ainsi qu'envers le président du jury le professeur Patrice Dalle et ses membres Monsieur Frédéric Adragna, Monsieur Xavier Descombes et Madame Anne Chanié.

Cette thèse a été cofinancée par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) et mon employeur actuel, la société Communication & Systèmes (CS). Elle s'est déroulée au sein de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT). Des données radar ont été aimablement fournies par l'Office National d'Études et Recherches Aéronautiques (ONERA) pour servir de support au travail de thèse. Ces collaborations furent l'opportunité de côtoyer différents milieux riches en expériences et en rencontres et je présente par avance mes excuses à ceux que je n'ai pu citer.

Je remercie en premier lieu les cieux de m'avoir initié à la théologie du radar par l'intermédiaire d'un de ses meilleurs prophètes : le visionnaire Frédéric Adragna qui a bien été inspiré de proposer le sujet de thèse « Extraction du 3D par interférométrie radar à haute résolution ». Mais ce parcours initiatique aurait été impossible sans la patience, la pédagogie et la clairvoyance de mon guide spirituel et accessoirement directeur de thèse Jean-Denis Durou.

Je garde en mémoire les nombreux rites sacrés pratiqués avec Pierre, Anne-Marie, Alain, Boris, Alexandre, Vincent, Yazid, Guillaume et les nombreux autres disciples en l'honneur de Dionysos. Je me souviens de grands moments de contemplations au cours des recherches métaphysiques accomplies avec Jean-Claude, Jean-Marc, Nadine, Philippe, Cédric, Patrick. Je salue Jacky Desachy et Georges Fisses qui me sont apparus lors des premières révélations. Je remercie les anges qui sont intervenus à diverses reprises pour me permettre de conduire cette thèse à son terme : Catherine, Régine...

Je remercie Patrice Berranger et Jacques Coves pour la confiance qu'ils m'ont accordée en me permettant de mettre en application mon expérience liturgique sur de nombreux projets au sein de la société.

Enfin, je remercie mes muses et amis qui m'ont accordé leur soutien perpétuel : Virginie, Céline, Sébastien, Bruno, Houria, ainsi que toute ma famille.

Résumé

Depuis quelques années, l'interférométrie radar a largement démontré son aptitude à mesurer de faibles déplacements du sol, ou à recréer des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Ainsi, la récente mission SRTM permet l'élaboration d'un MNT mondial, notamment dans des contrées où l'abondante couverture nuageuse interdisait l'utilisation de moyens optiques classiques.

L'usage des techniques interférométriques aux hautes résolutions, notamment en milieu urbain, est un peu plus délicat. En effet, les caractéristiques géométriques d'acquisition et les propriétés de l'onde radar créent des ambiguïtés dans le signal interférométrique : rebonds multiples, repliements de signaux, masquages, débordements des réponses de réflecteurs à radiométrie forte.

Dans un premier temps, une approche par simulation a été retenue, afin d'étudier l'impact des phénomènes mis en jeu, et de tester les techniques susceptibles de lever les ambiguïtés, dans des conditions parfaitement maîtrisées. Ce simulateur, appelé 2SIR (pour Simulation d'Images Radar et Simulation d'Interférogrammes Radar), génère les interférogrammes susceptibles d'être produits par différents types de surfaces et différents modèles 3D d'objets, en gérant un certain nombre d'effets de masquage, de réflexions et de pénétration des ondes.

La phase d'une image radar seule est supposée être spatialement aléatoire, mais temporellement corrélée. Toutefois l'usage du simulateur a permis de mettre en évidence que celle-ci pouvait quand même être spatialement corrélée dans certaines circonstances. Ce phénomène a pu être vérifié sur des images réelles et sa prise en compte permet une utilisation optimale des techniques interférométriques (suppression d'artéfact d'acquisition, détection de cibles ponctuelles, traitement adapté des structures anthropiques...).

En effet, les techniques de reconstruction du relief sont conditionnées par la qualité interférométrique. La cohérence est un outil courant d'évaluation de cette qualité, mais son estimation suppose des conditions d'ergodicité et de stationnarité rarement remplies. Il est donc nécessaire de recourir à des hypothèses sur le comportement du signal, inhérentes à la technique de reconstruction du relief appliquée par la suite. Le comportement de la cohérence a pu être testé grâce au simulateur 2SIR dans différentes situations, notamment pour des reliefs prononcés.

Notons que la forte incidence de la visée radar permet - *a priori* - d'éclairer certaines façades de bâtiments, et donc d'obtenir un modèle numérique de la scène plus complet qu'un simple modèle numérique d'élévation. Toutefois, en géométrie radar, le signal renvoyé par une façade de bâtiment est superposé au signal retourné par le sol qui lui fait face : c'est le phénomène du repliement. Des techniques optimisées de filtrage ont été développées afin de détecter les repliements et de séparer leurs composantes.

Enfin, en milieu urbain, le comportement du signal renvoyé par un élément de la scène est radicalement différent selon qu'il s'agit d'un bâtiment, d'un sol goudronné, d'un arbre, d'un véhicule, etc. La reconstruction par interférométrie radar ne peut donc être optimale si la nature de l'objet n'est pas prise en compte. Une méthode de classification des éléments de l'image et de reconstruction « 3D » adaptée a donc été mise au point. Elle se fonde sur une modélisation des objets de la scène en s'appuyant sur des concepts de logique floue adaptés au radar et au milieu urbain.

Summary

Since few years, radar interferometry has largely highlighted its aptitude to measure low displacements of the ground, or to recreate Digital Elevation Models (DEM). Thus, recent SRTM mission allows production of a world DEM, in particular in regions where the abundant cloud cover prohibits the use of traditional optical means.

The use of interferometric techniques for high resolutions, in particular in urban environment, is the trickiest. Indeed, the geometrical characteristics of a radar acquisition and the properties of the radar wave create ambiguities in the interferometric signal: multiple rebounds, layover of signals, masking and overflows of responses of strong reflectors.

Initially, an approach by simulation was adopted, in order to study the impact of the phenomena brought into play, and to test the techniques likely to raise ambiguities, under perfectly controlled conditions. This simulator, called 2SIR (for Radar Images Simulation and Radar Interferograms Simulation), generates the interferograms likely to be produced by various types of surfaces and different 3D forms of objects, while managing different effects like masking, reflection and penetration of waves in certain objects.

The phase of a single radar image is supposed to be spatially random, but temporally correlated. However, the use of the simulator made possible to show up that the phase could nevertheless be spatially correlated in certain circumstances. This phenomenon could be checked on real images. Taking it into account allows an optimal use of the interferometric techniques (suppression of artefacts of radar synthesis, detection of specific targets, and adapted processings for the anthropic structures...).

Indeed, the techniques for rebuilding relief are conditioned by interferometric quality. Coherence is a standard tool for evaluation of this quality, but its estimation supposes ergodicity and stationary conditions that are seldom satisfied. It is thus necessary to resort to assumptions on the behaviour of the signal. These are inherent with the techniques for rebuilding relief, applied thereafter. The behaviour of coherence could be tested thanks to simulator 2SIR in various situations, in particular for tortured reliefs.

Let us note, that the strong incidence of the radar sight makes it possible - a priori - to light frontages of buildings, and thus to obtain a “3D” digital model of the scene more complete than a simple digital elevation model. However, in a radar geometry, the signal returned by a frontage of building is superimposed on the signal thrown back by the ground which faces it: it is the phenomenon of layover. Optimized techniques of filtering were developed in order to detect foldings up and to separate their components.

Lastly, in urban environment, the behaviour of the signal, reflected by an element of the scene is radically different according as it is a question of a building, a tarred ground, a tree, or a vehicle, etc. The rebuilding by radar interferometry cannot thus be optimal if the nature of the object is not taken into account. A method of classification for components of an image and an adapted “3D” rebuilding method were thus developed. They are based on modeling of objects of the scene while being based on concepts of fuzzy logic adapted to the radar and the urban environment.

Sommaire

SOMMAIRE	11
NOTATIONS	15
INTRODUCTION	19
1. RECONSTRUCTION DU RELIEF PAR INTERFÉROMÉTRIE ROS.....	21
1.1 PRINCIPES DE L'IMAGERIE RADAR.....	21
1.1.1. <i>Principe du Radar à Ouverture Synthétique</i>	21
1.1.1.1. Bref historique du radar imageur.....	21
1.1.1.2. Radar à visée latérale.....	22
1.1.1.3. Radar à ouverture synthétique	26
1.1.2. <i>Interaction matière-rayonnement</i>	32
1.1.2.1. Rôle de la longueur d'onde.....	32
1.1.2.2. Rétrodiffusion radar.....	35
1.1.2.3. Chatoiement.....	37
1.1.2.4. Mécanismes de rétrodiffusion	38
1.1.2.5. Rôle de la polarisation	39
1.1.3. <i>Géométrie de l'image radar</i>	40
1.1.3.1. Vision en distance.....	40
1.1.3.2. Analogie avec les systèmes optiques.....	42
1.1.4. <i>Reconstruction du relief en imagerie radar</i>	43
1.1.4.1. Radargrammétrie	43
1.1.4.2. Radarclinométrie	45
1.2 PRINCIPES ET LIMITATIONS DE L'INTERFÉROMÉTRIE ROS	47
1.2.1. <i>Hypothèses interférométriques</i>	47
1.2.1.1. Propriétés de la phase radar	47
1.2.1.2. Postulats de l'interférométrie	50
1.2.1.3. Cas monostatique et cas bistatique	51
1.2.2. <i>Principe de l'interférométrie</i>	52
1.2.2.1. Calcul interférométrique.....	52
1.2.2.2. Interférométrie différentielle	54
1.2.2.3. Interférométrie stéréoscopique	56
1.2.2.4. Cohérence interférométrique	59
1.2.3. <i>Limitations de l'interférométrie</i>	60
1.2.3.1. Ambiguïtés interférométriques.....	60
1.2.3.2. Écart au postulat 4 (ou principe du décalage spectral)	62
1.2.3.3. Écart au postulat 1	69
1.2.3.4. Écarts aux postulats 2 et 3	73
1.3 TECHNIQUES DE RECONSTRUCTION DU RELIEF PAR INTERFÉROMÉTRIE ROS	73
1.3.1. <i>Déroulement des franges</i>	73
1.3.2. <i>Estimation du relief</i>	74
1.3.2.1. Hauteurs absolues.....	74
1.3.2.2. Hauteurs relatives	75

1.3.2.3. Reconstruction du relief	78
1.3.2.4. Rotondité terrestre	79
1.4 CONCLUSIONS.....	81
2. PHASE ET HAUTE RÉOLUTION.....	83
2.1 HAUTE RÉOLUTION EN IMAGERIE RADAR	83
2.1.1. <i>Notion de haute résolution</i>	83
2.1.1.1. Caractéristiques résolvantes d'un système ROS	83
2.1.1.2. Résolution après filtrage fréquentiel.....	84
2.1.1.3. Haute résolution.....	87
2.1.2. <i>Imagerie ROS et haute résolution</i>	89
2.1.2.1. Comportement de l'amplitude sur une image ROS à haute résolution	89
2.1.2.2. Comportement de la phase sur une image ROS à haute résolution.....	91
2.2 CORRÉLATION SPATIALE DE LA PHASE.....	92
2.2.1. <i>Estimation de la corrélation spatiale de la phase</i>	92
2.2.1.1. Estimateurs	92
2.2.1.2. Corrélation induite par la réponse impulsionnelle.....	94
2.2.2. <i>Mesures sur des données réelles</i>	95
2.2.2.1. Remarque sur les mesures de corrélation spatiale de phase	95
2.2.2.2. Surfaces naturelles.....	95
2.2.2.3. Éléments brillants	96
2.2.2.4. Surfaces anthropiques.....	97
2.2.2.5. Artéfacts	99
2.3 MODÉLISATION STATISTIQUE POUR DES SURFACES HOMOGÈNES	100
2.3.1. <i>Modélisation de la phase</i>	100
2.3.1.1. Modèle de Goodman	100
2.3.1.2. Extension du modèle de phase de Goodman	101
2.3.2. <i>Analyse statistique du nouveau modèle</i>	102
2.3.2.1. Décomposition de l'intégrale (2.204).....	102
2.3.2.2. Réponse de type sinus cardinal.....	102
2.3.2.3. Espérance mathématique du champ complexe modélisé	103
2.3.2.4. Matrice de covariance des variables aléatoires.....	103
2.3.2.5. Phase du champ complexe moyen.....	104
2.3.2.6. Notes sur l'approximation de $\sin C_{int}$	104
2.3.3. <i>Simulations</i>	105
2.3.3.1. Conditions de simulation.....	105
2.3.3.2. Modèle théorique.....	107
2.3.3.3. Rôle de la réponse impulsionnelle.....	108
2.4 CONCLUSIONS.....	109
3. TRAITEMENT DES REPLIEMENTS POUR LA RECONSTRUCTION DU	
« 3D ».....	111
3.1 FILTRAGE DE PENTE	111
3.1.1. <i>Cohérence interférométrique dans les zones de repliement</i>	111
3.1.1.1. Estimation de la cohérence	111
3.1.1.2. Comportement de la cohérence dans la zone de repliement.....	114
3.1.2. <i>Optimisation de la technique interférométrique pour une pente connue</i>	116
3.1.2.1. Sélection de pente.....	116
3.1.2.2. Interférométrie de pente.....	117
3.1.2.3. Cohérence de pente.....	119
3.2 SÉPARATION DES REPLIEMENTS	120

3.2.1. Détection des repliements.....	120
3.2.1.1. Données sources	120
3.2.1.2. Détection de pente	120
3.2.1.3. Détection des pentes dans une zone de repliement	122
3.2.1.4. Détection des repliements.....	124
3.2.1.5. Limitations.....	125
3.2.2. Reconstruction dans une zone de repliement	127
3.2.2.1. Reconstruction par Interférométrie de Pente (RIP)	127
3.2.2.2. Méthode de déroulement RIP « 2D » pour des bâtiments.....	129
3.2.2.3. Exemples de reconstructions d'une simulation de bâtiment	133
3.3 CONCLUSIONS.....	137
4. RECONSTRUCTION OPTIMISÉE DU « 3D ».....	139
4.1 PRÉSENTATION DES DONNÉES	139
4.1.1. Données RAMSES.....	139
4.1.2. Données AeS.....	140
4.2 RECONSTRUCTION DES SURFACES.....	140
4.2.1. Surfaces naturelles	140
4.2.1.1. Surfaces canoniques	140
4.2.1.2. Reliefs tourmentés	141
4.2.1.3. Interactions volumiques.....	141
4.2.2. Surfaces anthropiques	141
4.2.2.1. Interférométrie appliquée aux bâtiments	141
4.2.2.2. Interférométrie appliquée aux coins réflecteurs	143
4.2.2.3. Milieu urbain	144
4.3 RECONSTRUCTION DES OBJETS DE LA SCÈNE.....	148
4.3.1. Éléments de logique floue employés.....	148
4.3.1.1. Problématique.....	148
4.3.1.2. Fuzzification et définition des fonctions d'appartenance	149
4.3.1.3. Relations floues	151
4.3.1.4. Défuzzification	153
4.3.2. Principes de base de la reconstruction d'objets.....	153
4.3.2.1. Objets recherchés.....	153
4.3.2.2. Algorithme global de reconstruction « 3D »	154
4.3.3. Algorithme détaillé de reconstruction	154
4.3.3.1. Extraction d'information pixélique	154
4.3.3.2. Reconnaissance d'éléments et extraction d'informations de plus haut niveau	155
4.3.3.3. Reconnaissance d'objets et reconstruction « 2D »	157
4.3.3.4. Reconstruction « 3D »	158
4.3.4. Exemple de reconstruction	158
4.3.4.1. Classification des éléments de la scène	158
4.3.4.2. Reconstruction « 3D »	159
4.4 CONCLUSIONS.....	160
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	161
5. ANNEXES	163
5.1 RADIOMÉTRIE ET ÉQUATION RADAR	163
5.1.1. Grandeurs radiométriques	163
5.1.1.1. Flux énergétique Φ	163

5.1.1.2. Densité de flux énergétique F	163
5.1.1.3. Intensité d'une source ponctuelle I	163
5.1.1.4. Luminance énergétique L	164
5.1.1.5. Angle solide $d\Omega$	164
5.1.1.6. Section équivalente radar σ_{pq}	164
5.1.1.7. Coefficient de rétrodiffusion σ_{0pq}	165
5.1.1.8. Fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle	166
5.1.2. <i>Grandeurs associées aux antennes</i>	167
5.1.2.1. Ouverture plane	167
5.1.2.2. Efficacité d'antenne η	168
5.1.2.3. Gain d'antenne G	169
5.1.2.4. Directivité d'antenne D	169
5.1.2.5. Surface effective d'antenne σ_A	170
5.1.2.6. Diagramme de rayonnement F_N	170
5.1.2.7. Lobes d'antenne	170
5.1.2.8. Ouverture angulaire Θ d'une antenne	171
5.1.3. <i>Équation radar</i>	172
5.1.3.1. Puissance renvoyée par une cible	172
5.1.3.2. Caractéristiques d'un pixel en fonction des angles de pente	173
5.1.3.3. Radiométrie et déclivité	176
5.2 MODULE DE SIMULATION 2SIR	179
5.2.1. <i>Description générale</i>	179
5.2.1.1. Principes de base du simulateur	179
5.2.1.2. Versions	179
5.2.2. <i>Bases de données du simulateur</i>	180
5.2.2.1. Base de données de matériaux	180
5.2.2.2. Base de données d'objets	181
5.2.2.3. Base de données de terrains	183
5.2.3. <i>Simulation du signal retourné</i>	184
5.2.3.1. Le lancer de rayons	184
5.2.3.2. Modélisation du signal reçu	186
5.2.3.3. Les modes interférométriques	186
5.3 DÉVELOPPEMENT COMPLET DES CALCULS	187
5.3.1. <i>Approximation géométrique utilisée en interférométrie</i>	187
5.3.2. <i>Extension du modèle de Goodman</i>	188
6. BIBLIOGRAPHIE	195
7. INDEX	201
7.1 INDEX DES FIGURES	201
7.2 INDEX DES TABLEAUX	207
7.3 INDEX DES MOTS CLÉS	208

Notations

NOTATIONS GÉNÉRALES

$\ \vec{u}\ $	Norme euclidienne du vecteur \vec{u} .
$\vec{u} \wedge \vec{v}$	Produit vectoriel des vecteurs \vec{u} et \vec{v} .
${}^t A$	Transposée de la matrice A .
$\left. \begin{array}{c} a \\ b \\ c \end{array} \right _{\mathfrak{R}}$	Composantes d'un vecteur dans une base \mathfrak{R} .
$A \times B$	Produit matriciel des matrices A et B .
$\vec{u} \cdot \vec{v}$	Produit scalaire des vecteurs \vec{u} et \vec{v} .
\underline{z}	Complexe \underline{z} .
$ \underline{z} $ ou $ x $	Module d'un complexe \underline{z} ou valeur absolue d'un réel x .
\underline{z}^*	Complexe conjugué de \underline{z} .
\bar{e}	Négation logique.
\otimes	t-norme ou relation ET en logique floue.
\oplus	t-conorme ou relation OU en logique floue.
\tilde{X}	Mesure approchée de la grandeur X .
$\langle X \rangle$	Moyenne spatiale de la grandeur X .
Π_B	Fonction porte telle que $\begin{cases} \forall x \in [-B/2, B/2], \Pi_B(x) = 1, \\ \forall x \notin [-B/2, B/2], \Pi_B(x) = 0. \end{cases}$
df	Différentielle de la fonction f .
ξ	Erreur sur l'estimation ou l'approximation.
Arg	Fonction qui renvoie l'argument d'un complexe.
sinC	Fonction sinus cardinal, définie par : $\text{sinC}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$.
ArcSinC	Fonction inverse de la fonction sinus cardinal, définie de l'intervalle $\left[\frac{2}{3\pi} \sin\left(\frac{3\pi}{2}\right), 1 \right]$ dans $\left[0, \frac{3\pi}{2} \right]$, par : $y = \text{ArcSinC}(x) \Leftrightarrow \text{sinC}(y) = x$.
E	Espérance d'une variable aléatoire.
Ent	Fonction partie entière.
Frac	Fonction partie décimale ou fractionnaire.
\underline{j}	Nombre complexe imaginaire pur dont le carré a pour valeur -1 .
$TF\{\underline{S}\}$	Transformée de Fourier d'un signal complexe unidimensionnel \underline{S} .

$TF^{-1}\{\underline{S}\}$	Transformée de Fourier inverse de \underline{S} .
$TF_d\{\underline{z}\}$	Transformée de Fourier d'une image complexe \underline{z} selon l'un des deux axes (distance ou azimuth) ou bien selon les deux axes (transformée « 2D »).
$TF_a\{\underline{z}\}$	
$TF_{2D}\{\underline{z}\}$	
$TF_d^{-1}\{\underline{z}\}$	Transformée de Fourier inverse d'une image complexe \underline{z} selon l'un des deux axes (distance ou azimuth) ou bien selon les deux axes (transformée « 2D » inverse).
$TF_a^{-1}\{\underline{z}\}$	
$TF_{2D}^{-1}\{\underline{z}\}$	

NOTATIONS DU ROS

α_q	Angle de pente dans la direction de la distance.
β_{pq}	Angle de pente dans la direction de l'azimut une fois que la pente induite par la pente en distance a été corrigée.
δ_a	Pas de pixel en azimuth du système radar.
δ_d	Pas de pixel en distance du système radar (<i>slant range</i>).
δ_d sur sol plat	Pas de pixel en distance du système radar projeté sur un sol supposé plat (<i>ground range</i>).
Δ_a	Résolution en azimuth du système radar.
Δ_d	Résolution en distance du système radar (<i>slant range</i>).
Δ_d sur sol plat	Résolution en distance du système radar projetée sur un sol supposé plat (<i>ground range</i>).
ϕ	Angle azimuthal de l'antenne dans un repère horizontal centré sur la cible.
φ	Phase de signal radar.
Φ_m	Puissance mesurée par le système.
Φ_t	Puissance transmise à l'antenne.
θ	Angle zénithal de l'antenne dans un repère horizontal centré sur la cible (angle de dépointage de l'antenne par rapport à la verticale si la courbure terrestre est négligée).
θ'	Angle d'incidence de l'onde par rapport au sol dans un plan vertical ($\theta - \alpha_q$).
Θ	Ouverture angulaire de l'antenne dans la direction de l'azimut.
λ	Longueur d'onde centrale de l'onde hyperfréquence.
τ	Durée de l'impulsion hyperfréquence (<i>chirp</i>).
A	Amplitude de signal radar.
B	Bande passante du signal radar ou largeur de modulation du <i>chirp</i> .
c	Célérité de la lumière dans le vide.
D	Modulation Doppler du signal en azimuth, c'est-à-dire bande passante du signal en azimuth.
DP	Distance proximale (<i>near range</i>).

f_0	Fréquence de la porteuse $f_0 = \frac{\lambda}{c}$.
k	Paramètre de résolution fonction de la réponse impulsionnelle du système radar.
k_h	Paramètre de résolution fonction de la réponse impulsionnelle h du système radar.
F_e	Fréquence d'échantillonnage du signal radar.
FRI	Fréquence de répétition des impulsions (<i>Pulse Repetition Frequency</i>).
N	Nombre de cibles ponctuelles par pixel dans le modèle de Goodman et le modèle de Goodman étendu.
R	Distance cible-antenne.
R_0	Distance minimale cible-capteur au cours de la trajectoire de la plate-forme.
R_a	Distance cible-antenne émettrice.
R_b	Distance cible-antenne réceptrice.
u	Coordonnée en azimuth d'un pixel d'une image en géométrie radar.
U	Norme de la vitesse relative par rapport au sol de la plate-forme radar le long de sa trajectoire.
v	Coordonnée en distance d'un pixel d'une image en géométrie radar.
X	Projection imaginaire de la mesure du champ électrique de l'onde reçue.
Y	Projection réelle de la mesure du champ électrique de l'onde reçue.

NOTATIONS DE L'INTERFEROMÉTRIE

α_b	Angle d'inclinaison du second porteur par rapport à l'horizontale passant par le premier porteur.
Δf	Décalage spectral de la réponse d'une surface entre deux acquisitions radar.
Δf_s	Différence de décalage spectral des réponses de deux surfaces entre deux acquisitions radar pour une zone de repliement.
Δ_θ	Résolution angulaire du système interférométrique.
$\delta\varphi_{2 \rightarrow 1}$	Différence de phase entre les images radar 1 et 2.
ω	Angle entre le vecteur cible \rightarrow capteur1 et la ligne de base entre les deux capteurs.
b	Ligne de base (<i>baseline</i>) entre les deux capteurs.
b_{ortho}	Ligne de base orthogonale (<i>orthogonal baseline</i>) entre les deux capteurs.
B_s	Largeur de bande spectrale sélectionnée pour le calcul d'une ou plusieurs sous-vues.
C_i	Conditions géométriques d'acquisition de l'image i (angle de dépointage de l'antenne, localisation).

E_a	Altitude (ou élévation) d'ambiguïté.
H	Hauteur de bâtiment.
k_{st}	Type d'interférométrie : cas monostatique ($k_{st} = 1$) et cas bistatique ($k_{st} = 2$).
$nb_{\text{sous-vues}}$	Nombre de sous-vues produites à partir d'une image radar complexe.
N_r	Nombre de pixels en distance contenus dans une zone de repliement.
s_f	Séparabilité en fréquence de deux signaux interférométriques superposés dans une zone de repliement.

CONVENTIONS

La représentation des images radar associe généralement l'axe des distances aux colonnes et l'axe des azimuts aux lignes. Cependant, dans le but d'accroître la lisibilité des schémas « 3D », et de conserver un sens trigonométrique aux repères, l'axe des azimuts a été associé à la coordonnée x , tandis que l'axe correspondant à la position en distance a été associé à la coordonnée y . Sauf mention contraire, les images radar sont donc orientées selon la convention axe vertical pour l'azimut en dépit de la dénomination des coordonnées dans les calculs (coordonnée verticale notée « x »).

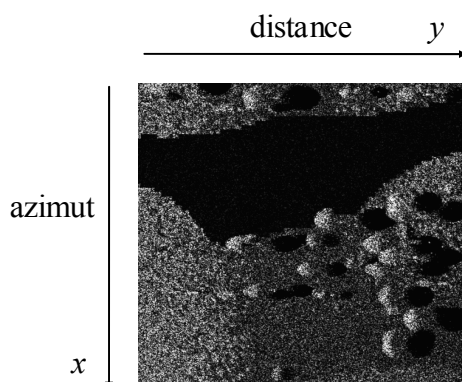


FIGURE 1-1. *Convention d'orientation des images radar (sauf mention contraire).*

En outre, afin de distinguer clairement les résultats qui sont le fruit de travaux personnels de ceux qui ont pu faire l'objet d'une collaboration, le pronom personnel « je » est employé chaque fois que cela semble justifié. Le « nous » désigne donc le fait de travaux communs ou la prise à partie du lecteur dans un raisonnement. Il est donc recommandé de ne pas conclure à la marque d'un « ego » hypertrophié dans l'usage surabondant du pronom mais seulement à l'expression d'un souci de clarté.

Introduction

L'imagerie radar suscite depuis quelques années un intérêt grandissant, de par ses aspects opérationnel (couverture assurée quelles que soient les conditions météorologiques et l'heure de la journée), économique (des technologies maîtrisées à coûts réduits) et scientifique (information complémentaire aux systèmes optiques) et en raison de multiples applications. L'interférométrie radar exploite pour sa part la corrélation des signaux électromagnétiques obtenus lorsque les conditions d'acquisition sont proches. Ainsi, les débuts de l'interférométrie ont marqué les esprits par l'étude des mouvements de la croûte terrestre : déflations de volcans, tremblements de terre notamment grâce aux travaux du Centre National d'Études Spatiales (CNES) [Massonnet 1993a, Massonnet 1994].

Outre une mesure fine des mouvements de terrain, l'interférométrie a également rapidement montré son aptitude à mesurer le relief. Or, l'avènement des systèmes radar aéroportés et très bientôt spatiaux dits « à haute résolution » offrent de nouveaux horizons à cette thématique, qui reste difficile à aborder en raison des spécificités des signaux radar.

Les travaux effectués au cours de cette thèse ont donc pour objectif d'identifier, d'étudier et de développer de nouveaux traitements qui permettraient de s'affranchir de ces spécificités pour la reconstruction du « 3D » d'une surface complexe dans le domaine de la haute résolution.

Dans une première partie, je présente l'état de l'art et les limitations associées au contexte de la haute résolution. Je rappelle tout d'abord les concepts mis en jeu dans l'imagerie radar, et plus particulièrement en interférométrie radar. Je présente ensuite les techniques décrites dans la littérature et actuellement employées pour reconstruire le relief, tout en soulignant leurs limites dans le cadre de la haute résolution.

La seconde partie s'efforce d'étendre la modélisation de la donnée source de l'interférométrie, dans le cadre de la haute résolution. Je me penche dans un premier temps sur le comportement de la phase radar en haute résolution. L'interférométrie repose en effet sur des concepts de modélisation de la phase qui s'avèrent moins appropriés dans ce cadre. Je définis ensuite des estimateurs de la corrélation spatiale de la phase en haute résolution, employés sur des simulations et sur des données réelles. Enfin, je propose un modèle comportemental de la phase susceptible d'expliquer un comportement corrélé de la phase sur certaines surfaces homogènes, en haute résolution.

La troisième partie définit des méthodes d'aide à la reconstruction du « 3D » dans les zones de repliement radar (*layover*). En effet, la notion de « 3D », en particulier en milieu urbain, implique la présence de surfaces en repliement les unes par rapport aux autres, en géométrie radar. La faible cohérence interférométrique mesurée dans ces zones conduit souvent à ignorer ce signal. Je propose une méthode de détection de telles zones. Je développe ensuite un procédé de reconstruction du « 3D » dans une zone de repliement, validé sur des simulations.

La quatrième partie extrait un maximum d'informations présentes dans le signal complexe et emploie des techniques de traitement et d'analyse de l'image pour optimiser la reconstruction « 3D » par des méthodes de logique floue inspirées de règles probabilistes. Nous pouvons en effet détecter grâce à une approche sémantique un certain nombre d'éléments dans l'image radar qui constituent des repères clés pour la reconstruction,

comme par exemple les coins réflecteurs ou les ombres. Enfin, la forme « 3D » peut être régularisée en tenant compte des caractéristiques de l'objet reconnu.

Je conclus sur les possibilités offertes par l'interférométrie radar pour la reconstruction du « 3D ».

Les annexes complètent les informations fournies au cours du document. La première annexe propose des définitions de toutes les grandeurs liées à la radiométrie et employées dans ce document. Ensuite, je donne une présentation du simulateur 2SIR employé à diverses reprises pour observer et mesurer des phénomènes, puis pour développer et valider des méthodes de traitement, en complément aux données réelles disponibles. Enfin, le développement complet de certains calculs est proposé dans la troisième annexe.

1. Reconstruction du relief par interférométrie ROS¹

L'objectif de ce chapitre est de donner un état de l'art en matière de reconstruction du relief par interférométrie ROS. Dans un premier temps, je rappelle les principales notions associées aux techniques du radar imageur, et plus particulièrement à l'interférométrie radar. Le lecteur initié pardonnera cette longue introduction au problème devant la nécessité d'une définition claire des concepts employés dans le reste du document. Je présente ensuite les méthodes interférométriques de reconstruction du relief.

1.1 Principes de l'imagerie radar

Le lecteur connaissant les principes de l'imagerie radar pourra directement continuer sa lecture au paragraphe 1.2. Je l'invite cependant à un survol de ce paragraphe qui, en rappelant certains concepts (différences entre résolution et pas de pixel, bande passante, géométrie de l'image, mécanismes d'interaction, nature de la phase), permet directement d'introduire les points problématiques du traitement interférométrique.

1.1.1. Principe du Radar à Ouverture Synthétique

1.1.1.1. Bref historique du radar imageur

Apparus au cours de la seconde guerre mondiale, les radars se sont tout d'abord révélés comme des atouts militaires tactiques, pour la détection d'intrusions d'ennemis ou la localisation de cibles. Si leur développement fut donc, dans un premier temps, étroitement lié à des intérêts stratégiques puis cartographiques (imagerie de grande surface par tous les temps : au Canada, aux États-Unis, en Russie...), il prit un nouvel essor avec l'apparition des techniques de synthèse radar (qui seront succinctement décrites un peu plus loin). L'amélioration de la résolution induite par ces techniques permit en effet d'élargir le champ des applications, tant militaires que civiles.

Les nouvelles perspectives offertes se concrétisèrent par le lancement de satellites ROS civils (SEASAT du JPL en 1978, ERS-1 de l'ESA et Almaz en 1991, J-ERS-1 en 1992, ERS-2 en 1995, RadarSat en 1995, ENVISAT en 2002) et de nombreuses missions des navettes spatiales américaines avec des radars embarqués (SIR-A en 1981, SIR-B en 1984, SIR-C en 1994, SRTM en 2001). Le nombre grandissant de missions et de systèmes dédiés (RadarSat 2 en 2003), ainsi que les nombreux projets de micro-satellites radar en cours d'élaboration (Cosmo/Skymed, Sar Lupe, Terrasar) dénotent l'intérêt grandissant pour ce type d'imagerie.

En outre, les systèmes aéroportés ont très vite complété les systèmes spatiaux notamment grâce à leurs capacités haute résolution et l'emploi de capteurs multi-antennes : AIRSAR

¹ ROS : Radar à Ouverture Synthétique ou *Synthetic Aperture Radar* (SAR).

(JPL, États-Unis), PHARUS (TNO-FEL, Pays-Bas), E-SAR (DLR, Allemagne), RAMSES (ONERA, France), CARABAS (NDRE, Suède), Convair 580 (CCRS, Canada).

1.1.1.2. Radar à visée latérale

Principe de la visée latérale

L'objectif du radar imageur à visée latérale (*SLAR*²) est d'obtenir une image (de préférence, selon un repère orthonormal³) d'une surface au sol. Une antenne est donc placée, à bord d'un avion⁴ et orientée latéralement au porteur, qui se déplace parallèlement à la zone à imager (cf. figure 1-1). La visée latérale définit les deux axes de l'image :

- **Axe distance (*cross track*).** Le temps de retour de l'impulsion électromagnétique fournit la position en distance des différents éléments réflecteurs de la surface. Les signaux mesurés sont donc repérés par la distance, qui définit la première composante de l'image. La distance associée au premier point de l'image est appelée « distance proximale » (*near range*), tandis que celle associée au dernier point est appelée « portée distale » (*far range*). La différence entre ces deux distances détermine la profondeur de champ observé appelée « fauchée ». Nous pouvons noter sur la figure 1-1 que la fauchée est choisie plus petite que la profondeur de champ éclairé.
- **Axe azimuth (*along track*).** Les positions occupées par le porteur tout au long de sa trajectoire indiquent la position de la projection orthogonale de la cible dans la direction de déplacement. Pour des raisons historiques, cette composante a été dénommée azimuth (en référence aux premiers radars de détection aérienne qui avaient un axe de rotation azimuthale).

Remarque :

L'angle θ désigne l'angle d'incidence de l'onde par rapport à la verticale au niveau de la cible (normale au géoïde de référence du système géographique).

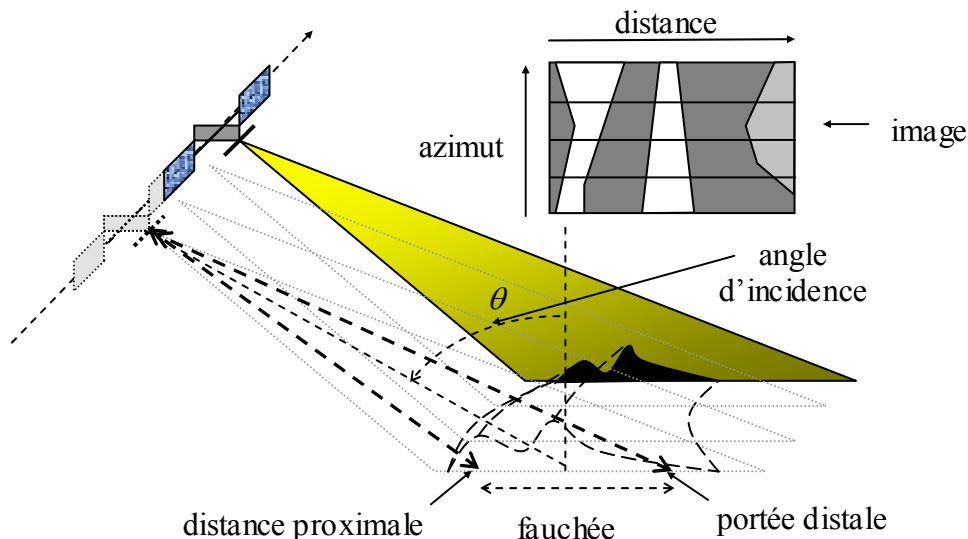


FIGURE 1-1. Radar à visée latérale.

² *SLAR : Sideways Looking Airborne Radar.*

³ La géométrie de l'image est déformée lorsque l'antenne ne vise pas exactement perpendiculairement à la trajectoire.

⁴ Nous verrons plus loin que le SLAR ne permet pas une résolution acceptable en mode satellital et est donc employé seulement en mode aéroporté.

Le système d'acquisition

Le système d'acquisition échantillonne et numérise les signaux reçus. Le signal est donc discrétisé et quantifié. Le nombre d'étages de quantification est généralement de quelques bits. La largeur de l'image en distance est restreinte par la profondeur de champ éclairé, en revanche sa taille en azimuth n'est limitée que par le temps total d'acquisition, c'est-à-dire par des contraintes de mémoire (pour les systèmes embarqués) et par la bande passante du canal de retransmission des données vers le sol (pour les systèmes satellitaires).

L'antenne de réception est ordinairement la même que celle qui a émis l'impulsion hyperfréquence. Le système doit donc alterner entre des phases d'émission et de réception, afin de réceptionner les échos radar. C'est ce que permet le circulateur, qui dirige chaque signal entrant vers la sortie suivante (cf. figure 1-2).

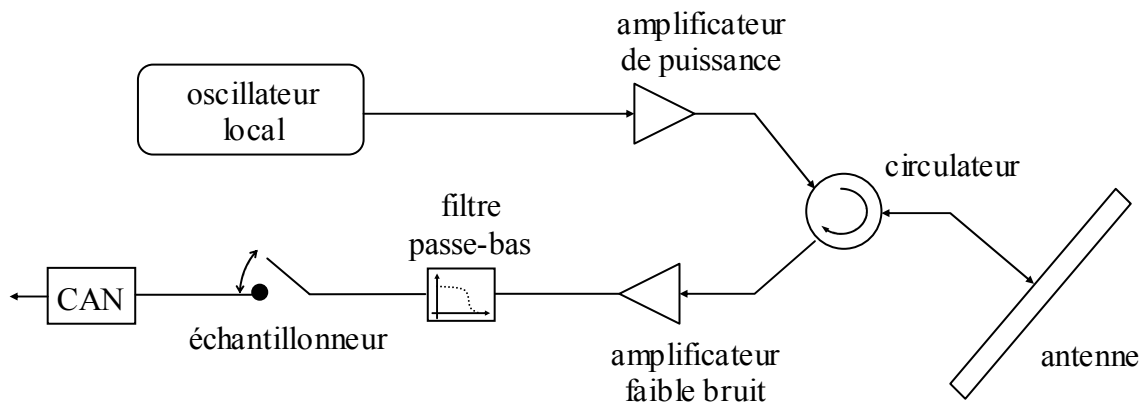


FIGURE 1-2. *Synoptique de l'instrument radar : l'amplitude du signal reçu est échantillonné.*

Le principe de la réception est simple :

- Le signal est d'abord amplifié.
- Il est ensuite nettoyé de la porteuse.
- Puis il est échantillonné à une fréquence F_e .
- Finalement, un Convertisseur Analogique/Numérique (CAN) permet de produire l'information qui sera stockée, et éventuellement traitée, à bord de la plate-forme aéroportée ou spatiale.

Pas entre pixels

Le procédé de numérisation implique nécessairement un échantillonnage du signal. Deux grandeurs caractérisent donc le dispositif d'acquisition :

- La fréquence d'échantillonnage F_e .
- La FRI^5 : le rythme de répétition des phases d'émission et de réception.

En azimuth, le pas entre pixels est inhérent à la FRI et à la vitesse de progression du lobe principal d'éclairement dans la direction azimuthale. Si U est la norme de la vitesse relative du porteur par rapport au sol, c'est-à-dire sa vitesse dans la direction azimuthale, le pas de pixel δ_a en azimuth est alors le suivant :

$$\delta_a = \frac{U}{FRI} \quad (1.1)$$

⁵ Fréquence de Répétition des Impulsions ou *Pulse Repetition Frequency (PRF)*.

En distance, c'est la fréquence d'échantillonnage qui est déterminante. Un facteur 2 intervient dans le pas d'échantillonnage, puisque la distance séparant le radar de la cible est parcourue deux fois (aller-retour) :

$$\delta_d = \frac{c}{2F_e} \quad (1.2)$$

En outre, il faut considérer l'angle d'incidence de l'onde par rapport à la verticale pour obtenir le pas de pixel projeté sur un sol supposé plat :

$$\delta_{d \text{ sur sol plat}} = \frac{c}{2F_e \sin \theta} \quad (1.3)$$

Remarque :

Le pas entre pixels selon l'axe des distances dépend véritablement, au niveau du sol, de l'angle d'incidence effectif, c'est-à-dire de l'angle entre le vecteur d'onde et la verticale du point au sol. En conséquence, le pas de pixel varie en distance. En outre, si le sol n'est pas plat (ce qui est généralement le cas), le pas de pixel en distance δ_d dépend aussi de la pente locale du sol.

Résolutions

Si les dimensions et pas de l'image sont déterminés par les fréquences caractéristiques du dispositif d'acquisition (FRI , F_e), la résolution (finesse du pouvoir séparateur du capteur) en est indépendante. Toutefois, les systèmes imageurs sont généralement conçus de manière à faire coïncider pas et résolutions, ce qui évite une redondance de l'information et garantit une exploitation maximale des performances du système.

La résolution se définit en radar comme étant la largeur à -3 dB du lobe principal de la puissance de la réponse impulsionnelle (cf. figure 1-3). La puissance est proportionnelle au carré de l'amplitude. Si A_{\max} représente l'amplitude maximale de la réponse impulsionnelle, la résolution se déduit de la largeur du lobe principal au point où l'amplitude vaut $0,707 A_{\max}$. L'expression exacte est donnée par la formule (1.4).

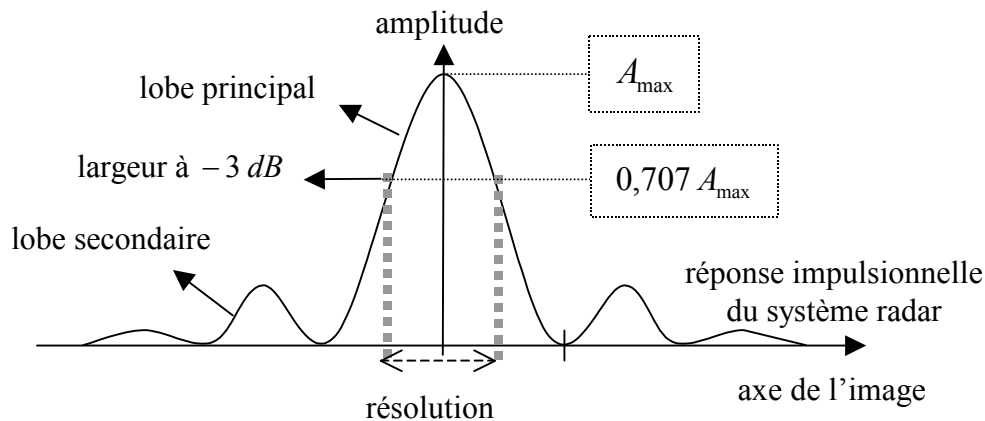


FIGURE 1-3. Résolution d'un système radar.

$$20 \log \left(\frac{A}{A_{\max}} \right) = -3 \Rightarrow A = 10^{-3/20} A_{\max} \approx 0,707 A_{\max} \quad (1.4)$$

En azimut, la résolution du système est directement liée à la directivité⁶ de l'antenne. Or celle-ci est d'autant plus forte, dans un plan considéré, que la longueur d'onde est petite ou que la taille de l'antenne est grande (cf. paragraphe 5.1.2). Une antenne très longue produira donc un faisceau radar très pincé dans ce plan et inversement si elle est courte dans l'autre plan (cf. figure 1-4). La dynamique du diagramme d'antenne est telle que les contributions des lobes secondaires sont négligées au premier abord.

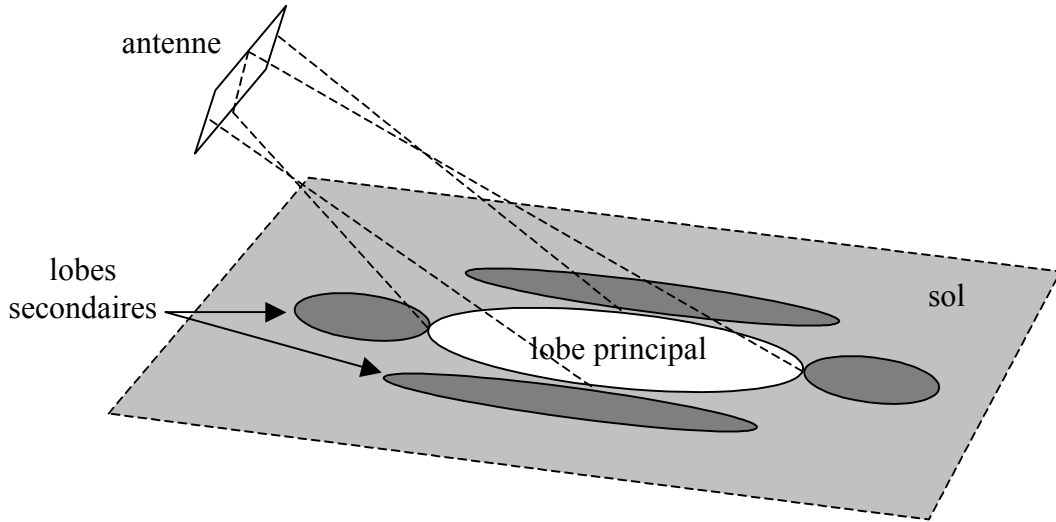


FIGURE 1-4. Projection du diagramme d'antenne au sol.

La résolution en azimut est donc nécessairement dimensionnée par l'ouverture du faisceau radar dans ce plan. En pratique, les longueurs d'onde sont de l'ordre du centimètre et les antennes de quelques mètres, ce qui donne des ouvertures de quelques degrés (ou inférieures, dans un cas spatial : de l'ordre de 0,2 degrés). D'où la résolution en azimut Δ_a (cf. paragraphe 5.1.2.1) :

$$\Delta_a \approx R \frac{\lambda}{a} \quad (1.5)$$

où R est la distance du radar à la zone à imager, λ la longueur d'onde et a la demi-longueur de l'antenne. Cette technique n'autorise donc pas de résolutions inférieures au kilomètre, pour les plate-formes satellitaires, ou à la dizaine de mètres pour les systèmes aéroportés.

Ce qui contraint la résolution en distance du dispositif est la durée de l'impulsion radar émise. En effet, considérons un train d'onde hyperfréquence de durée τ . Pour pouvoir discerner les échos de deux cibles considérées comme ponctuelles, le délai les séparant doit être bien entendu supérieur à τ .

Comme le montre la figure 1-5, le deuxième écho parcourt deux fois la distance Δ_d . Ainsi, la différence de trajet entre les deux trains d'onde est $2\Delta_d$. La résolution en distance est donc le chemin parcouru par l'impulsion pendant la durée $\tau/2$:

$$\Delta_d \approx c \frac{\tau}{2} \quad (1.6)$$

Le facteur contraignant est maintenant la durée de l'impulsion radar. Il est techniquement délicat de mettre en œuvre des trains d'onde d'un laps de temps inférieur à la micro-seconde, car il faut alors concentrer un maximum d'énergie dans l'impulsion, pour espérer avoir des

⁶ Définition donnée dans le paragraphe 5.1.2.4.

échos d'amplitude significative. Nous obtenons assez difficilement, par cette méthode, des résolutions inférieures à la centaine de mètres. Cependant, le satellite russe Almaz⁷ était capable d'atteindre une résolution proche de 7 m avec des impulsions de 490 kW en crête et d'une durée de quelques nano-secondes.

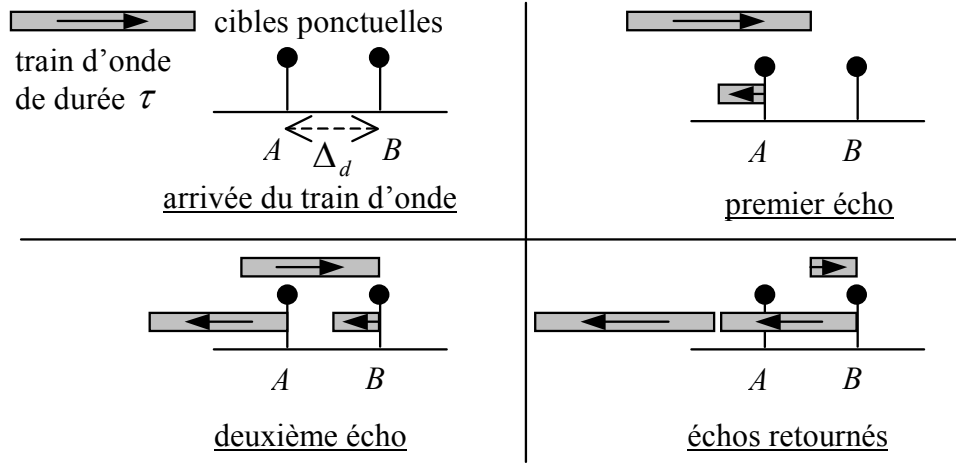


FIGURE 1-5. Distance minimale entre deux cibles ponctuelles.

Nous observons que la résolution en distance est indépendante de l'altitude du porteur. Mais il faut de nouveau prendre en compte l'angle d'incidence θ de l'onde pour obtenir la résolution en distance du système radar projetée sur un sol supposé plat :

$$\Delta_{d \text{ sur sol plat}} \approx c \frac{\tau}{2 \sin \theta} \quad (1.7)$$

1.1.1.3. Radar à ouverture synthétique

Le système d'acquisition

Le système d'acquisition d'un radar à ouverture synthétique diffère de celui d'un SLAR (cf. figure 1-6).

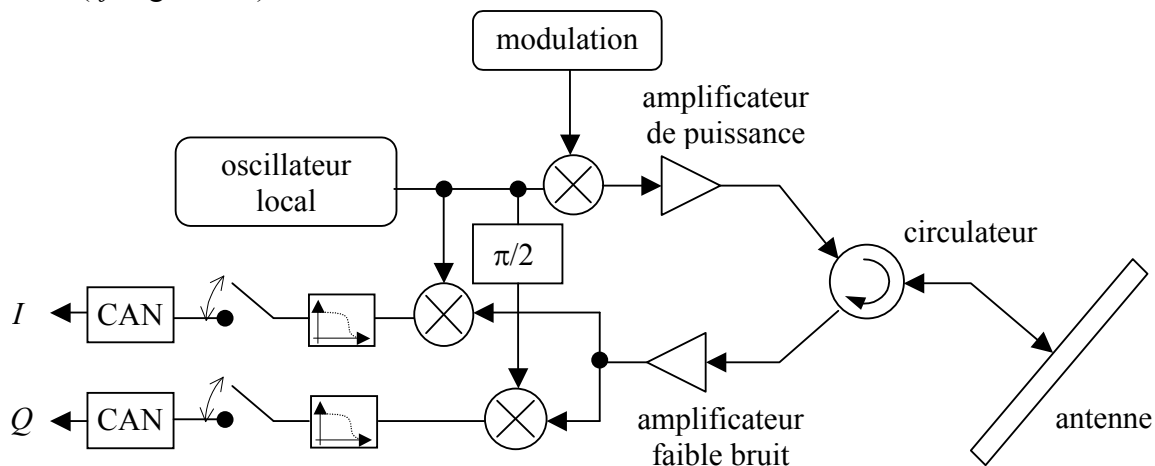


FIGURE 1-6. Synoptique de l'instrument radar : I et Q désignent les signaux échantillonnés, respectivement les parties réelle et imaginaire du signal complexe.

⁷ Le satellite ALMAZ n'était pas réellement un SLAR, cependant sa résolution en distance fonctionnait selon le même principe.

L'antenne réceptrice est parfois différente de l'antenne émettrice, cependant, le principe de la réception reste le même :

- Le signal est d'abord amplifié.
- Il est ensuite transmis à deux démodulateurs couplés avec l'oscillateur local, qui suppriment la porteuse du signal. Les démodulateurs sont déphasés de $\pi/2$ afin de séparer deux projections du signal dans l'espace des phases (partie réelle et partie imaginaire du signal complexe). Le signal généré est nettoyé de la porteuse (dont la fréquence a été doublée par la démodulation) par un filtre passe-bas.
- Il est échantillonné sur les deux canaux à une fréquence F_e .
- Deux Convertisseurs Analogique/Numérique (CAN) permettent de produire l'information qui sera stockée, et éventuellement traitée, à bord de la plate-forme aéroportée ou spatiale.

Il résulte de ce système d'acquisition que le radar imageur ne fournit pas une image, mais deux images (ou plus, s'il y a une information de polarisation) : une image d'amplitude A et une image de phase φ déduites des deux signaux I et Q . Seule la radiométrie constitue une information naturellement appréciable. L'emploi du terme « image radar » désigne donc généralement l'image d'amplitude. Cependant, la phase représente une mesure extrêmement précise du décalage temporel entre signaux. Cette grandeur s'avérera particulièrement pertinente dans les calculs interférométriques ou dans les techniques de synthèse radar. Nous pouvons donc considérer le signal reçu en un point de l'image de coordonnées (u, v) comme un signal complexe bidimensionnel de la forme :

$$\underline{z}(u, v) = A(u, v) \exp(j\varphi(u, v)) \quad (1.8)$$

Échantillonnage

La FRI et la fréquence d'échantillonnage F_e sont toujours des grandeurs caractéristiques du système mais une contrainte est ajoutée à F_e liée à la bande de modulation B du signal par le théorème de Shannon :

$$F_e \geq B \quad (1.9)$$

Remarque :

Généralement, le signal est légèrement sur-échantillonné d'un facteur 1,2.

Compression d'impulsion

La section 1.1.1.2 a mis en évidence les faiblesses d'un système radar brut, en matière de résolution. Le premier facteur limitant est la technicité requise pour produire une impulsion de courte durée et de forte amplitude. Les premiers travaux visèrent donc à réduire ce laps de temps et aboutirent au principe de la compression d'impulsion.

La figure 1-6 décrit schématiquement un dispositif complet d'émission et d'acquisition. La modulation revêt deux fonctions distinctes, visant à une meilleure interprétation du signal reçu :

- L'introduction d'un codage (dans notre cas, une modulation de fréquence) permet de distinguer aisément le signal acquis du bruit de fond ou d'émissions parasites (systèmes de brouillage).
- Une modulation linéaire en fréquence permet d'accroître la résolution en distance, grâce à un traitement approprié.

La technique la plus usitée consiste à corrélérer le signal reçu avec le signal de modulation attendu : c'est le filtrage adapté. Elle maximise le rapport signal sur bruit. Ainsi, pour une impulsion modulée linéairement en fréquence (de largeur de bande B) et dont la densité

spectrale est sensiblement uniforme (cf. figure 1-7), la corrélation au signal retourné produit une réponse de type sinus cardinal pour une cible ponctuelle. Celle-ci est d'autant plus étroite que la largeur de bande est grande. Le temps τ de l'impulsion comprimée est alors (pour une largeur du lobe principal à -3 dB) :

$$\tau \approx \frac{0,885}{B} \quad (1.10)$$

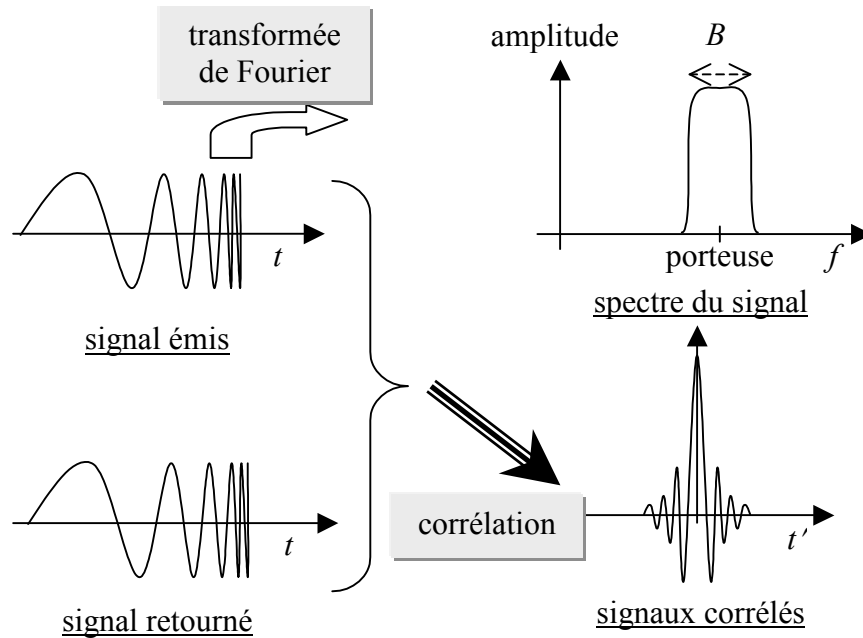


FIGURE 1-7. Principe du filtrage adapté ou de la compression d'impulsion.

Résolution d'un système à compression d'impulsion

La fréquence d'échantillonnage F_e employée est généralement légèrement supérieure à la largeur de bande B utilisée pour la modulation, c'est-à-dire qu'elle a une valeur de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de MHz . Le temps associé à l'impulsion compressée est alors inférieur à $0,1 \mu\text{s}$, soit une résolution d'une dizaine de mètres à moins d'un mètre. Grâce au filtrage adapté, la résolution peut être excellente, même en utilisant des impulsions relativement longues. Ce procédé autorise donc des trains d'onde de fortes énergies avec des puissances instantanées plus modestes. Les résolutions en distance (dans le plan radar et au sol) obtenues pour un tel système sont :

$$\Delta_d = \frac{c}{2} \frac{k}{B} \quad (1.11)$$

$$\Delta_{d \text{ sur sol plat}} = \frac{c}{2} \frac{k}{B \sin \theta} \quad (1.12)$$

où k est le paramètre de la résolution à -3 dB associé au type de réponse impulsionnelle :

$$k = \frac{2 \text{ ArcSinC}(10^{-3/20})}{\pi} \approx 0,884487 \quad (1.13)$$

Si B est de l'ordre de F_e , nous remarquons que la résolution en distance est du même ordre de grandeur que le pas en distance défini par l'équation (1.2). Toutefois, si le signal est fort, les lobes secondaires du sinus cardinal produiront un étalement de la cible en distance. Les forts réflecteurs auront tendance à « baver » et à réduire la lisibilité de l'image en dépit d'une

excellente résolution. Cette définition de la résolution ne prend pas en compte l'importance des lobes latéraux qui peuvent parfois sérieusement détériorer la qualité de l'image. Des paramètres complémentaires sont souvent employés pour affiner la description de la qualité résolvante du système : PSLR (*Peak Side Lobe Ratio* : rapport entre la puissance d'un maximum latéral et la puissance maximale du lobe principal), ISLR (*Integrated Side Lobe Ratio* : rapport entre l'énergie totale des lobes latéraux et celle du lobe principal)...

Remarque :

L'impulsion modulée en fréquence est souvent désignée sous le nom de *chirp*⁸. En effet, si des vibrations acoustiques étaient associées aux échos radar, une oreille sensible aux hautes fréquences entendrait un son semblable au cri de la chauve-souris.

Antenne à ouverture synthétique

En azimuth, le facteur limitant la résolution est la trop grande ouverture de l'antenne. La solution la plus simple est d'accroître la taille de l'antenne, mais les systèmes aéroportés et spatiaux ne peuvent s'accommoder de dispositifs aux dimensions insolites.

La solution consiste à inverser le problème : plutôt que de chercher à réduire l'ouverture de l'antenne, il peut être intéressant de l'augmenter. La résolution est médiocre mais, si le porteur se déplace lentement, les zones d'illumination vont se recouvrir en partie. Ainsi, chaque écho est la somme des échos retournés par un nombre important de cibles, mais chaque cible est éclairée de nombreuses fois par l'antenne (cf. figure 1-8).

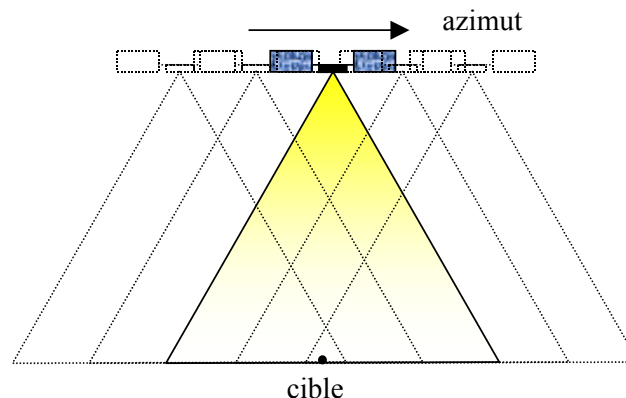


FIGURE 1-8. *Recouvrement des lobes d'illumination.*

L'information concernant une cible se retrouve donc répartie sur plusieurs lignes de l'image (si la coordonnée azimuthale correspond aux lignes de l'image, ce qui est généralement le cas), et si une méthode permet de soustraire la contribution des autres cibles, il est alors possible de synthétiser une antenne beaucoup plus grande, et par là même d'obtenir une antenne virtuelle, extrêmement directive. C'est le principe de la compression en azimuth (cf. figure 1-9). La difficulté à lever consiste donc à isoler le signal produit par une cible tout au long du parcours en azimuth.

Comme le montre la figure 1-9, la distance parcourue par l'écho pour arriver jusqu'à l'antenne varie le long du trajet. Cet écart de distance engendre une variation de phase du signal par rapport à l'oscillateur local. C'est cette signature qui va être exploitée. Si nous prenons comme référence de position en azimuth ($x = 0$) le moment où le radar est le plus proche de la cible, alors la distance d varie de la façon suivante :

⁸ « Gazouillis » en anglais, mais c'est aussi le nom du cri de la chauve-souris qui module les ultrasons qu'elle produit.

$$d = \sqrt{d_0^2 + x^2} \approx d_0 + \frac{x^2}{2d_0} \quad (1.14)$$

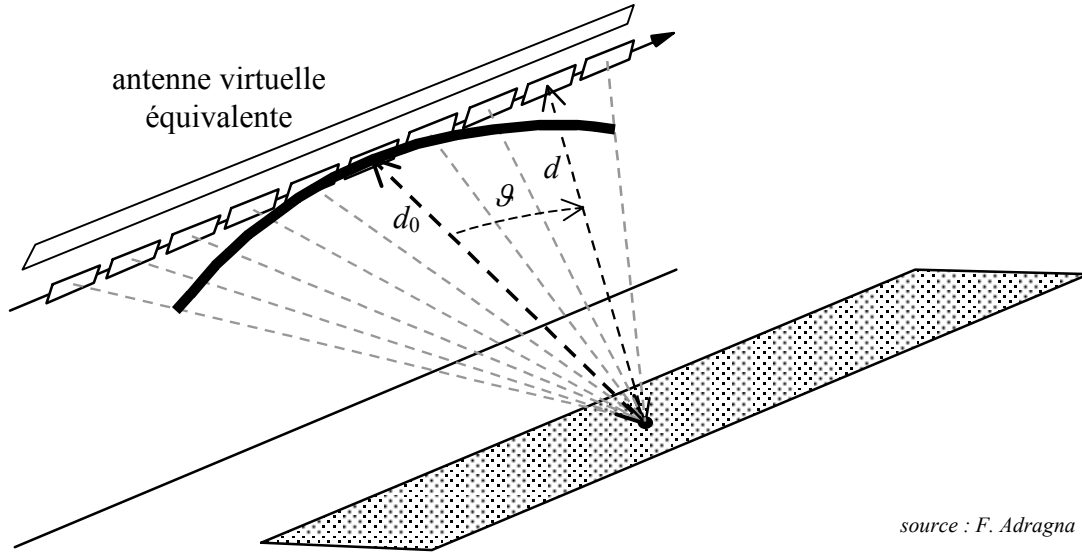


FIGURE 1-9. Antenne virtuelle équivalente.

La phase du signal reçu donne une mesure du décalage entre l'onde reçue et l'horloge interne. Celle-ci va donc être inhérente au trajet optique entre le capteur et la cible. Le train d'onde parcourant deux fois cette distance, nous en déduisons la variation de la phase φ le long de la trajectoire, qui au premier ordre peut-être considérée comme une variation quadratique :

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} 2(d - d_0) + \varphi_0 \approx \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{x^2}{d_0} + \varphi_0 \quad (1.15)$$

Si U est la vitesse relative du satellite par rapport au sol, nous pouvons associer à cette variation de phase un décalage en fréquence du signal Δf :

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (1.16)$$

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{2}{\lambda_0} \frac{x}{d} U = 2f_0 \frac{U}{c} \frac{x}{d} \quad (1.17)$$

$$\Delta f = 2f_0 \frac{U}{c} \sin \theta \quad (1.18)$$

Nous obtenons un signal modulé en fréquence selon l'azimut. Il s'agit de l'effet Doppler produit par le mouvement relatif du porteur par rapport à la cible⁹. Si, en première approximation, nous considérons que la modulation est linéaire en fréquence par rapport à l'angle θ , nous nous retrouvons dans le cas précédemment étudié de la compression d'impulsion et nous pouvons envisager d'effectuer un traitement similaire à celui réalisé en distance (une difficulté supplémentaire est que la durée de modulation varie avec la distance).

⁹ Bien que le signal émis ne soit pas continu, et que l'échantillonnage en azimut soit discret, il s'agit bien selon moi du même phénomène physique et géométrique que celui qui est l'origine de l'« effet Doppler », contrairement à ce qui a pu être écrit à plusieurs reprises dans la littérature.

Résolution d'une antenne à ouverture synthétique

Nous supposons dans un premier temps que le lobe principal du diagramme d'antenne peut être approché par une « fonction porte » et que nous pouvons négliger l'atténuation produite par la variation de distance entre la cible et le capteur durant l'illumination. L'amplitude maximale de modulation D se déduit des variations du décalage Doppler en fonction des angles extrêmes d'éclairement \mathcal{G}_{\min} et \mathcal{G}_{\max} du diagramme d'antenne :

$$D = \Delta f(\mathcal{G}_{\max}) - \Delta f(\mathcal{G}_{\min}) \quad (1.19)$$

Si l'ouverture de l'antenne en azimut est $\Delta \mathcal{G}$, et qu'elle ne dépointe ni vers l'avant ni vers l'arrière (visée orthogonale à la trajectoire), la modulation Doppler observée est :

$$D = 4f_0 \frac{U}{c} \sin\left(\frac{\Delta \mathcal{G}}{2}\right) \quad (1.20)$$

La compression d'impulsion nous permet d'obtenir, pour la résolution en azimut Δ_a , une formule équivalente à celle obtenue pour la résolution en distance (1.11) :

$$\Delta_a = U \frac{k}{D} \quad (1.21)$$

Le traitement de synthèse

Le radar à synthèse d'ouverture (RSO) met à profit la modulation du signal en distance et en azimut pour produire des images à haute résolution avec des antennes peu directives et des impulsions longues. En première approximation, les modulations peuvent être considérées comme linéaires, ce qui signifie que la phase du signal retourné par une cible ponctuelle varie paraboliquement en fonction de la fréquence de modulation. C'est en compensant cette variation parabolique de la phase que nous pouvons comprimer l'impulsion. Les données non traitées directement issues du capteur sont appelées « données brutes ». Les données obtenues après traitement sont appelées « données synthétisées ».

Cependant, le traitement de synthèse radar nécessite un certain nombre d'étapes supplémentaires pour obtenir une image finale exploitable [Massonnet 1994a]. Les principales corrections à effectuer concernent :

- **Les migrations.** Nous avons vu, avec le schéma de la figure 1-9, que la distance cible-capteur varie au cours de l'acquisition. Cela signifie que son signal modulé en fréquence n'est pas aligné sur une seule colonne (correspondant à une même distance). Ce phénomène est appelé « migration ». La migration est parabolique (au premier ordre), mais comporte également un terme linéaire si l'antenne ne pointe pas parfaitement dans la direction perpendiculaire à la trajectoire. Cette migration doit être compensée avant la compression en azimut. De nombreuses méthodes peuvent être employées [Lebedeff 1995].
- **La radiométrie.** Les variations de distance capteur-scène, le diagramme de l'antenne radar, le relief et les effets de bord du traitement de synthèse radar induisent des variations radiométriques dans l'image. Ces variations perturbent l'analyse des données et doivent bien entendu être compensées. En outre, des changements de dynamique peuvent être effectuées, afin d'améliorer la lisibilité de l'information contenue dans l'image.
- **La géométrie.** L'image est obtenue dans une géométrie dite « géométrie radar ». Elle doit donc être transformée (sauf si des traitements spécifiques doivent être appliqués : détection, multi-vue...), afin de correspondre à une « géométrie sol » et, plus précisément, à celle du référentiel géographique utilisé (référentiels de Lambert, ED87, WGS84...).

L'image est ensuite plaquée sur la **projection** associée (projections UTM¹⁰, conique, elliptique...).

La figure 1-11 donne un exemple de traitement réalisé avec un programme de synthèse radar que j'ai développé. Le synoptique laisse entendre que les traitements ont été effectués dans le domaine spatial, alors qu'en réalité, la synthèse a été effectuée grâce à des traitements de type fréquentiel et à un algorithme d'autofocalisation. Toutes les images étant systématiquement représentées en coordonnées distance-azimut, la synthèse dans le domaine spatial permettrait de traiter rigoureusement tous les paramètres géométriques de la scène et d'intégrer aisément les corrections de trajectoire utiles, mais présenterait en revanche une complexité de calcul très contraignante. C'est pourquoi des traitements de type fréquentiel [Lebedeff 1995][Petit 2001a] sont généralement privilégiés.

Nous ne détaillerons pas plus les principes de la synthèse d'ouverture. Nous retiendrons seulement que :

- À partir de données brutes complexes faiblement résolues, nous pouvons générer des données complexes synthétisées de la forme (1.8).
- La résolution du système selon les deux axes (distance et azimut) est inversement proportionnelle à la bande passante du signal selon chacun d'eux.
- La modulation en fréquence du signal en distance est produite électroniquement lors de l'émission de l'impulsion, tandis que la modulation du signal en azimut est produite par l'effet Doppler.

1.1.2. Interaction matière-rayonnement

1.1.2.1. Rôle de la longueur d'onde

Les bandes spectrales

Les fréquences radar partagent les bandes SHF¹¹ et UHF¹² avec d'autres applications industrielles : télévision, four à micro-ondes, télécommunications, etc... (cf. figure 1-10). Ce domaine fréquentiel est subdivisé en sept bandes, dont les plus utilisées en radar sont les bandes C, L pour les systèmes spatiaux et X, C, L pour les systèmes aéroportés (cf. tableau 1-1).


	1-10 μm	10-100 μm	0,1-1 mm	1-10 mm	1-10 cm	1-10 dm	10-100 dm
	infrarouge			micro-ondes			radio
				EHF	SHF	UHF	VHF
					radar		télévision

FIGURE 1-10. *Domaine fréquentiel radar.*

¹⁰ Universal Transverse Mercator.

¹¹ Super-Haute Fréquence.

¹² Ultra-Haute Fréquence.

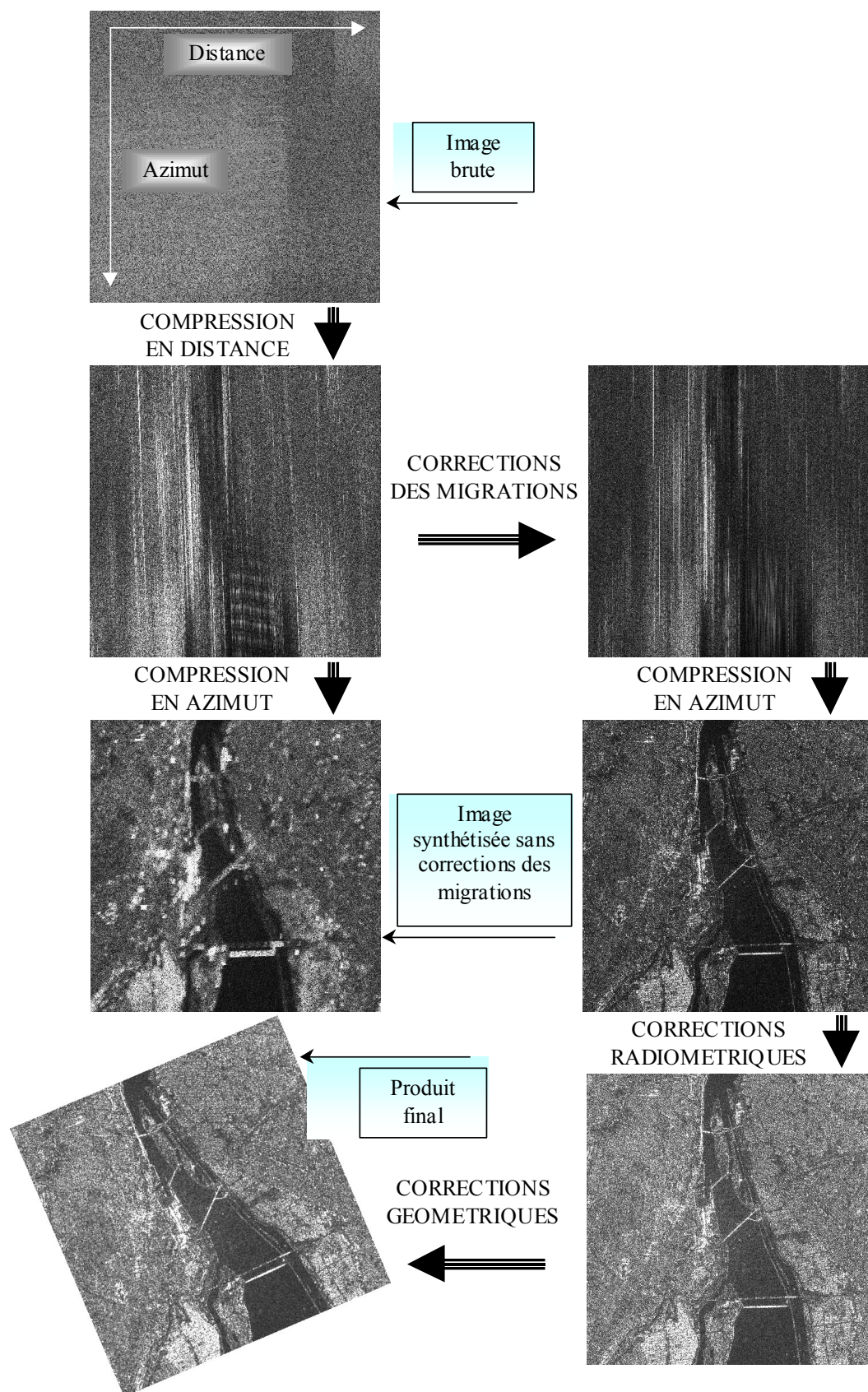


FIGURE 1-11. Exemple de traitement de synthèse radar (données RadarSat, Montréal).

bande spectrale	SHF				UHF		
	Ka	Ku	X	C	S	L	P
longueur d'onde (cm)	1	2	3,1	5,6	9,6	23	68
fréquence (GHz)	35	14	9,6	5,3	3,0	1,3	0,44

TABLEAU 1-1. *Bandes radar.*

Les types d'interactions

Nous pouvons considérer, en première approximation, trois modes d'interactions possibles, selon la section s des éléments que l'onde de longueur d'onde λ rencontre :

- $s \ll \lambda$: la puissance de l'onde est atténuée (diffusion) par le milieu traversé et un retard de phase est introduit.
- $s \approx \lambda$: tous les phénomènes relatifs à l'usage d'une onde cohérente sont possibles, notamment des phénomènes de diffraction et d'interférences.
- $s \gg \lambda$: les interactions (surfiques ou volumiques) respectent les principes de l'optique géométrique, mais les échos retournés interfèrent quand même entre eux (principes de l'optique géométrique appliqués au laser).

Compte tenu des longueurs d'onde radar, de la taille des éléments observés et des résolutions employées, il en résulte généralement les propriétés suivantes :

- L'onde est très peu sensible à l'état des couches atmosphériques traversées (nuages, humidité, température), pour lesquelles $s \ll \lambda$: possibilité de travailler par tous temps.
- Les plus grandes longueurs d'onde sont susceptibles de traverser ou de pénétrer certaines couches de surface (forêts, sable sec...), pour lesquelles $s \ll \lambda$.
- La part d'énergie renvoyée par une surface (pour laquelle $s \gg \lambda$) est inhérente à sa forme et à sa rugosité: la réflexion spéculaire joue un rôle important et des réflexions multiples sont possibles.
- Comme en optique laser, la radiométrie d'une surface homogène (pour laquelle $s \gg \lambda$) est modulée par les interférences induites par sa rugosité.
- Les propriétés diélectriques de la cible dimensionnent fortement le pouvoir réflecteur : l'eau et les objets métalliques sont particulièrement réfléchissants pour ces longueurs d'onde.
- Des phénomènes de diffraction peuvent s'observer sur certains éléments fins de la scène ou sur des coins de bâtiments.

Mon domaine d'étude

Dans le cadre de cette thèse, je travaille essentiellement avec des données issues de capteurs en bande X. La taille des structures observées est généralement beaucoup plus grande que la longueur d'onde (donc $s \gg \lambda$) et les principes de l'optique géométrique laser décrivent généralement bien le comportement du signal radar.

Entre les longueurs d'onde radar et celles des lasers, le rapport est de l'ordre de 10^5 , ce qui signifie qu'éclairer une zone urbaine (dont la rugosité des surfaces est de l'ordre du millimètre) avec une onde radar est à peu près équivalent à éclairer avec un laser une miniature de ville construite à partir de miroirs plus ou moins bien polis (dont la rugosité varie de moins d'un nanomètre à plusieurs de dizaines de nanomètres). Nous comprenons d'ores et déjà pourquoi les réflexions multiples vont sérieusement compliquer l'interprétation de l'image formée (d'autant que la géométrie radar est très différente de la géométrie optique).

1.1.2.2. Rétrodiffusion radar

L'équation radar

Nous considérons une cible de surface équivalente radar σ_{cible} , éclairée par une antenne a . La puissance mesurée Φ_m et reçue par une antenne radar b , du signal retourné peut être exprimée (cf. équation (1.22)) en fonction des principaux paramètres de l'interaction :

Φ_t : puissance transmise à l'antenne a émettrice.

G_a : gain de l'antenne a .

G_b : gain de l'antenne b .

R_a : distance cible-antenne a .

R_b : distance cible-antenne b .

σ_{cible} : surface équivalente radar.

$\theta_a, \theta_b, \phi_a, \phi_b$: coordonnées zénithales et azimutales des antennes a et b dans un repère sphérique centré sur la cible.

$$\Phi_m(\theta_a, \phi_a, R_a, \theta_b, \phi_b, R_b) = \Phi_t \frac{\lambda^2 G_b(\theta_b, \phi_b)}{4\pi} \frac{\sigma_{\text{cible}}}{4\pi R_b^2} \frac{G_a(\theta_a, \phi_a)}{4\pi R_a^2} \quad (1.22)$$

Le problème est abordé plus en détail en annexe (cf. paragraphe 5.1.3).

Le coefficient de rétrodiffusion

Lorsque le système est correctement calibré, seul σ_{cible} est inconnu. Il reflète les caractéristiques de la zone observée, et ses variations sont rendues par celles de l'amplitude du signal radar. Si la « cible » étudiée est une surface étendue S , la notion de coefficient de rétrodiffusion en décibels est généralement introduite¹³ (1.23) :

$$\sigma_0(dB) = 10 \log \left(\frac{\sigma_{\text{cible}}}{S} \right) \quad (1.23)$$

Ce coefficient permet de comparer les mesures obtenues sur des séquences d'images en s'affranchissant de l'effet de la taille du pixel. L'échelle logarithmique est généralement préférée car les propriétés interférentielles du signal radar produisent une dynamique d'amplitude beaucoup plus étendue que celle rencontrée en imagerie optique. Pour une image étalonnée, nous pouvons donc exprimer le coefficient de rétrodiffusion σ_0 en fonction de l'amplitude A et d'un coefficient de normalisation k_A :

$$\sigma_0 = 20 \log(k_A A) \quad (1.24)$$

¹³ Bien que le signal mesuré corresponde parfois à la rétrodiffusion d'une cible ponctuelle ou d'un objet siège d'interactions volumiques, la notion de coefficient de rétrodiffusion est utilisée. La surface S représente alors la surface du pixel pour une étendue plane horizontale.

Ce coefficient de normalisation rend le coefficient de rétrodiffusion nul (en dB) lorsque la surface est parfaitement diffusante, c'est-à-dire lorsque la même luminance est renvoyée dans toutes les directions. Le signe de σ_0 indique si la surface est plutôt spéculaire ou plutôt rétrodiffusante (cf. tableau 1-2).

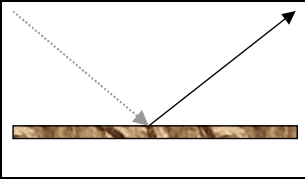
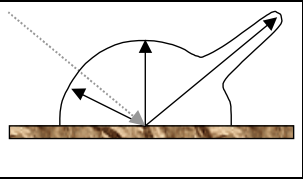
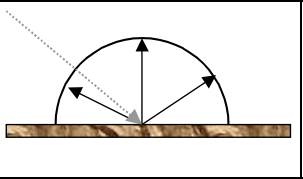
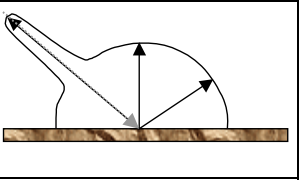
			
a. $\sigma_0 = -\infty$ <i>réflexion pure</i>	b. $\sigma_0 < 0$ <i>réflexion + diffusion</i>	c. $\sigma_0 = 0$ <i>diffusion pure</i>	d. $\sigma_0 > 0$ <i>effet de coin</i>

TABLEAU 1-2. Types de coefficients de rétrodiffusion.

Le tableau 1-3 donne une idée de la dynamique d'une image radar. Les ordres de grandeur sont purement indicatifs car le coefficient de rétrodiffusion dépend de l'angle d'incidence, de la longueur d'onde, de l'humidité et de nombreux autres paramètres. Nous pouvons cependant noter qu'entre $+50 \text{ dB}$ et -20 dB , il existe un rapport d'amplitude supérieur à 3000. La figure 1-12 nous donne un exemple d'histogramme de l'amplitude d'une image radar. En dépit de l'échelle logarithmique, la répartition statistique de la radiométrie est telle qu'une simple transformation linéaire de la dynamique produit une image peu contrastée.

type de surface	$\sigma_0 \text{ (dB)}$
cibles ponctuelles, navires, véhicules	+ 50
zones urbaines	+ 20
surface lambertienne	0
forêt, végétation	- 10
herbe rase	- 15
goudron, béton	- 22

TABLEAU 1-3. Exemples de coefficients de rétrodiffusion pour différentes surfaces.

Le coefficient de rétrodiffusion d'une surface est fonction des propriétés diélectriques de la surface mais aussi de la rugosité, de la pente locale, de l'humidité du sol, de l'orientation (pour les sillons d'un champ, par exemple), etc... Des tables ont été réalisées par Ulaby [Ulaby 1989] pour différents types de terrains et différentes incidences. Je propose un modèle simple en annexe (cf. paragraphe 5.2.2.1) tiré des tables de Ulaby et utilisé dans le logiciel de simulation 2SIR [Petit 1999] que j'ai développé (cf. paragraphe 5.2).

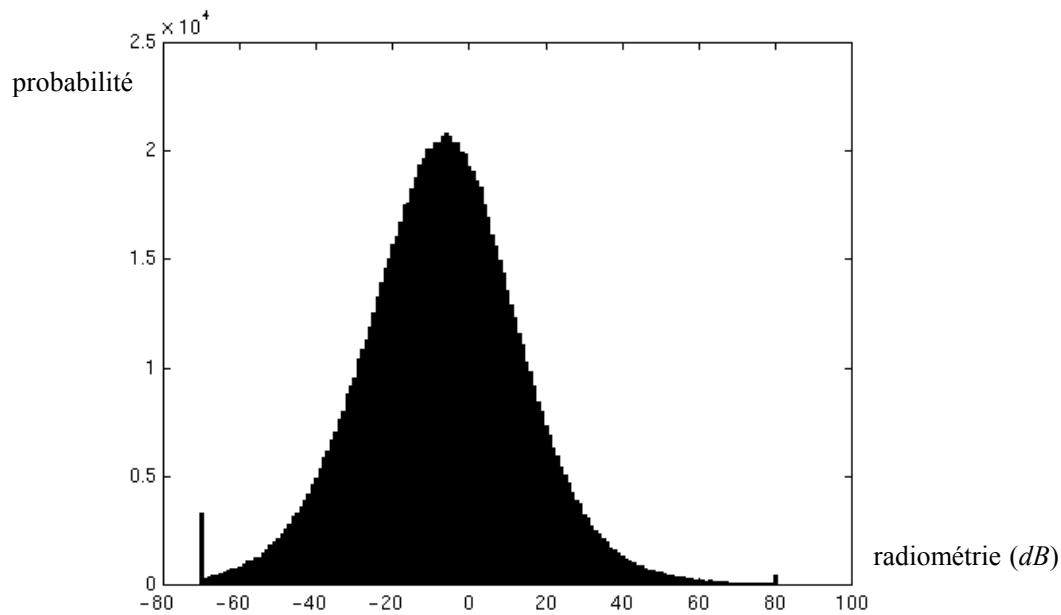


FIGURE 1-12. Exemple d'histogramme de l'amplitude d'une image radar.

1.1.2.3. Chatoiment

De même qu'en optique laser, l'onde cohérente radar est sensible aux micro-rugosités d'une surface. Ainsi, une zone dont les propriétés physiques semblent spatialement homogènes présente généralement d'importantes variations radiométriques (*cf.* figure 1-13) induites par les interférences constructives et destructives des échos retournés. Cela confère un aspect bruité à l'image.

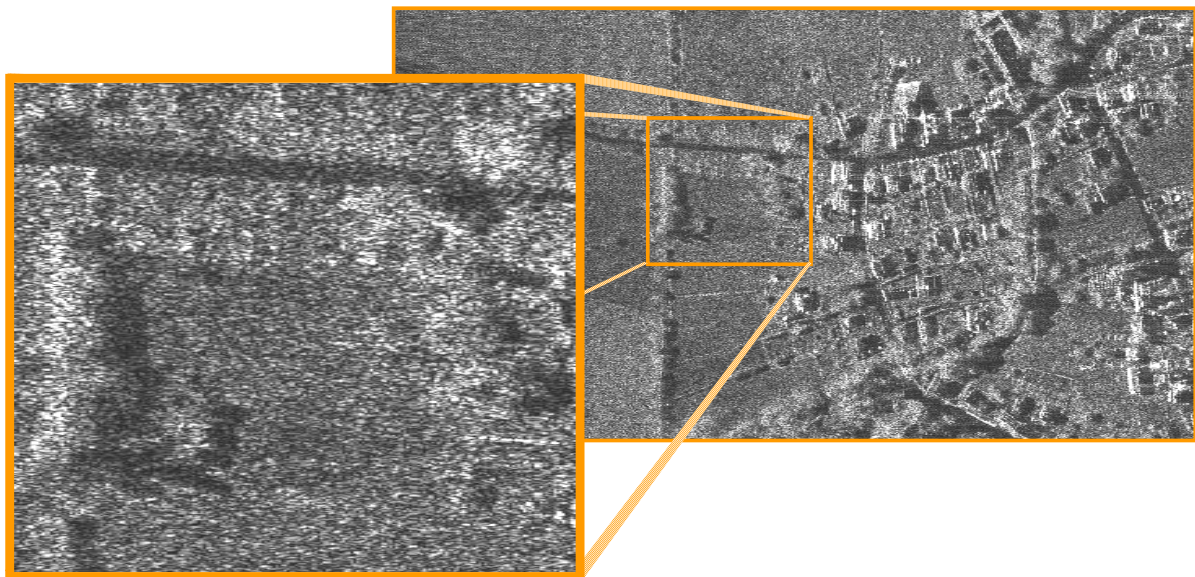


FIGURE 1-13. Le chatoiment sur une image radar (AeroSensing, bande X) : champ à proximité des villages de Biblisheim et Walbourg (France).

Ce phénomène, appelé « chatoiment » (*speckle* en anglais), fait l'objet de nombreux travaux. Ceux-ci considèrent que le coefficient de rétrodiffusion est une variable aléatoire dont la fonction de distribution est paramétrée par les propriétés physiques de la surface. La plus simple d'entre elles suppose que la surface est composée de réflecteurs élémentaires dont la distribution spatiale est totalement aléatoire [Goodman 1984]. Elle conduit à une fonction

de distribution f de l'amplitude du type « distribution de Rayleigh », dépendant de l'écart-type ET :

$$f(A) = \frac{A}{ET^2} e^{-\frac{A^2}{2ET^2}}, \quad \bar{A} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} ET, \quad \text{Variance}(A) = 0,429 ET^2 \quad (1.25)$$

Du fait de son caractère aléatoire, le chatoiement est généralement assimilé à un bruit. L'écart-type qui caractérise la variation est proportionnel à l'amplitude moyenne, il est donc qualifié de « bruit multiplicatif ».

1.1.2.4. Mécanismes de rétrodiffusion

Les coins réflecteurs

Nous savons que l'onde radar est particulièrement sensible à la géométrie de la surface. Ainsi, un angle droit constitue un objet extrêmement rétrodiffusant. Comme l'indique la figure 1-14, quel que soit l'angle d'incidence de l'onde, toute l'énergie est rétrodiffusée, excepté bien entendu celle qui est absorbée par le corps.

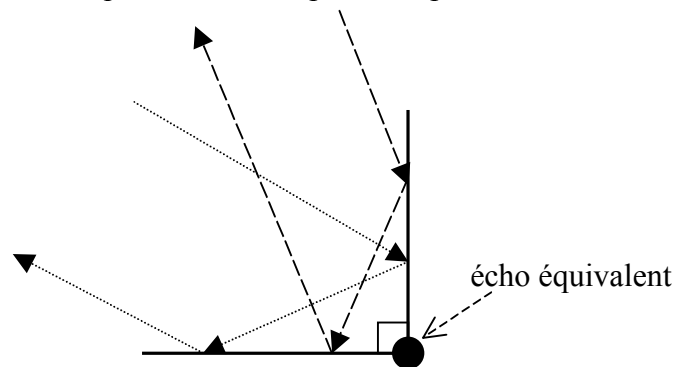


FIGURE 1-14. Schéma de coin réflecteur.

La forte radiométrie du coin réflecteur est amplifiée par un second phénomène : le radar ne perçoit que les distances, or la distance parcourue par l'onde est strictement indépendante de l'endroit où elle frappe l'objet. L'écho total renvoyé est donc interprété comme provenant de la base du coin réflecteur, quelles que soient ses dimensions.

Remarque :

Des coins réflecteurs artificiels (trièdres métalliques) sont parfois disposés au sol afin de fournir des points de référence sur l'image ou de calibrer les instruments.

Les bâtiments

Les façades de bâtiments tournées vers le radar ou les coins de fenêtres forment d'excellents coins réflecteurs artificiels. L'aspect radiométrique d'un bâtiment en imagerie radar est donc singulièrement marqué par la présence de tels coins réflecteurs. La figure 1-15 souligne le rôle des façades de bâtiments. Les murs tournés vers le radar montrent une radiométrie importante, entre autres en raison du double rebond généré par ces angles droits. En outre, du fait de la forte incidence d'observation radar (angle d'incidence moyen autour de 40 degrés), les zones d'ombre sont particulièrement importantes.

Ces indices visuels doivent donc faire l'objet d'une attention particulière lors de la mise en œuvre des techniques de reconstruction du « 3D » en milieu urbain.

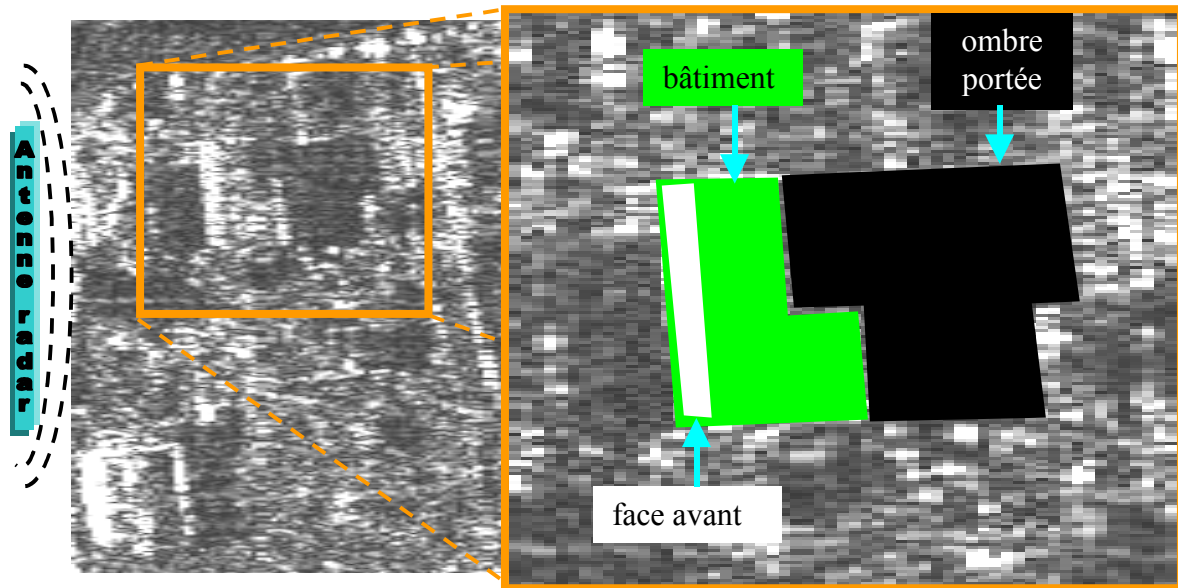


FIGURE 1-15. Double rebond et ombre portée dus à un bâtiment.

Les surfaces naturelles

Les mécanismes de rétrodiffusion pour les surfaces naturelles sont complexes, mais il faut distinguer trois types de scènes :

- **Les surfaces nues.** C'est le cas le plus simple d'interaction. Il s'agit d'une simple réflexion, dont l'intensité est fonction de la rugosité et, plus particulièrement, de la pente ; ce cas est généralement rencontré pour une couverture végétale peu dense et une grande longueur d'onde (bande L et plus).
- **Les cultures.** Le comportement de la rétrodiffusion peut être extrêmement variable selon le type de culture, l'âge de la plantation, l'orientation des parcelles ; la rétrodiffusion peut même être un excellent moyen de mesure de la biomasse, dans certains cas particuliers comme les rizières [Ribbes 1998].
- **Les couverts de végétaux.** Comme nous l'avons vu précédemment, la longueur d'onde utilisée est déterminante. Cependant, les interactions sont essentiellement volumiques. Pour la bande X, qui constitue l'essentiel de notre base d'étude, seul le haut de la canopée peut imposer sa signature radar.

1.1.2.5. Rôle de la polarisation

L'information polarimétrique

Du fait des symétries de l'antenne et de l'orientation privilégiée du champ électrique qu'elle produit, l'onde radar envoyée est polarisée. Les polarisations généralement employées sont dites « horizontale » (H) ou « verticale » (V), selon l'orientation du champ électrique. Une même antenne peut être composée d'un entrelacement de capteurs permettant d'employer les deux polarisations. Si des capteurs de même polarisation sont utilisés à la réception comme à l'émission, nous obtenons la réponse du sol pour une polarisation dite « simple » : HH ou VV . Sinon, il est possible d'obtenir des polarisations dites « croisées » : HV ou VH .

Les interactions rayonnement-matière peuvent dépolariser l'onde reçue. La nouvelle polarisation de l'onde est déduite de la précédente grâce à une matrice complexe de diffusion

comportant quatre termes : S_{HH} , S_{VV} , S_{HV} , S_{VH} . Dans le cas monostatique¹⁴, et si les données sont étalonnées, les termes correspondant aux interactions de polarisations croisées sont égaux ($S_{HV} = S_{VH}$), suivant le principe de réciprocité du trajet de l'onde.

Nous pouvons déduire de cette matrice, la matrice de covariance et la matrice de Mueller (ou matrice de Stokes), qui permettent d'étudier les propriétés statistiques de la rétrodiffusion polarimétrique pour des surfaces étendues [Maître 2001]. Une matrice hermitienne de cohérence est aussi parfois employée pour permettre de décomposer le mécanisme de rétrodiffusion comme la somme incohérente de trois rétrodiffusions élémentaires complètement polarisées [Pottier 1999][Imbo 1999].

Les mécanismes de rétrodiffusion

Selon Van Zyl [Van Zyl 1989], trois grands types de mécanismes de rétrodiffusion peuvent être illustrés simplement par la polarimétrie (en l'occurrence partielle) :

- **Les rétrodiffusions faisant intervenir un nombre impair de réflexions.** Cela désigne la rétrodiffusion classique sur une surface, mais aussi des réflexions triples. Elle est caractérisée par $\text{Arg}(S_{HH}S_{VV}^*) \approx 0$.
- **Les rétrodiffusions faisant intervenir un nombre pair de réflexions.** Cela correspond à un mécanisme de double rebond comme celui rencontré avec les coins réflecteurs ou les bâtiments. Il est caractérisé par $\text{Arg}(S_{HH}S_{VV}^*) \approx \pi$.
- **Les rétrodiffusions de type diffusif.** Elles font intervenir un grand nombre de réflexions produites par une distribution volumique d'éléments réflecteurs (des arbres, par exemple). Cela se traduit par une décorrélation totale des canaux S_{HH} et S_{VV} .

Quel que soit le type de représentation de l'information polarimétrique, celle-ci permet principalement de discriminer ces trois types de mécanismes. Elle représente donc un atout majeur dans l'étude des processus mis en jeu, notamment en milieu urbain. Toutefois, dans le cadre de cette thèse, nous n'aborderons pas le cas des données polarisées pour la reconstruction du « 3D » par interférométrie.

1.1.3. Géométrie de l'image radar

1.1.3.1. Vision en distance

Si de prime abord, la géométrie d'une image radar peut paraître similaire à celle d'une image issue de techniques optiques, les projections associées sont cependant fort différentes (cf. figures 1-16 et 1-17). En effet, tous les points situés à une même distance, pour une position azimutale déterminée, sont confondus en une seule projection.

Quatre effets, schématisés sur la figure 1-18, en résultent :

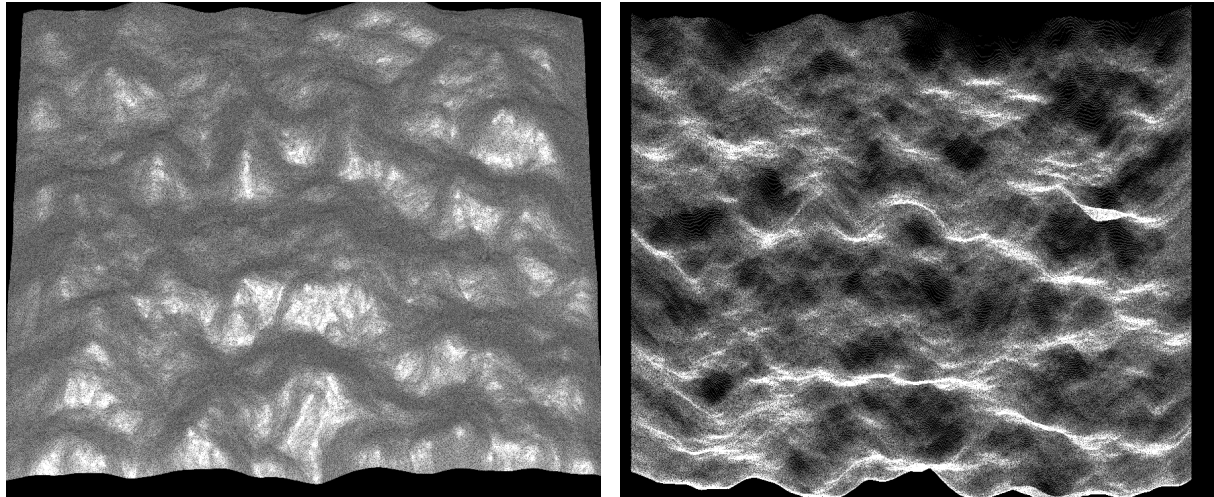
- **Avancée du relief.** L'écho renvoyé par une zone montagneuse précède celui de sa base. Les points C et E ont leurs projections respectives C' et E' inversées par rapport à leurs positions réelles au sol, contrairement à ce qui se passerait en imagerie optique.
- **Repliement¹⁵ ou recouvrement.** Des points appartenant à des zones de relief distinctes (par exemple B et E) sont confondus en imagerie radar, alors qu'ils seraient distincts en imagerie optique.
- **Raccourcissement¹⁶ et forte rétrodiffusion des pentes parallèles au front d'onde** (par exemple $C-D$). Pour une même taille de pixel en distance, une surface plus

¹⁴ L'antenne émettrice est aussi l'antenne réceptrice.

¹⁵ *Layover* en anglais.

importante est offerte à l'onde. Le nombre de réflecteurs correspondant à un pixel est donc variable. L'image apparaît localement comprimée (raccourcissement) et plus lumineuse. À cela se combine le fait que la surface est observée dans une direction proche de la direction spéculaire (forte rétrodiffusion).

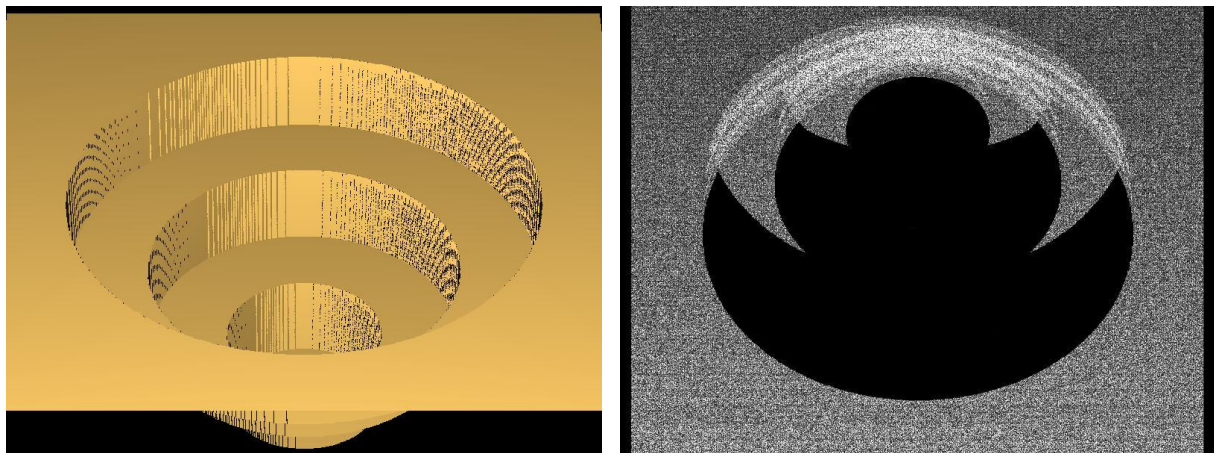
- **Dilatation.** Les pentes parallèles à la direction incidente offrent une vue dilatée de la surface, comparées aux pentes horizontales. Les points A' et C' sont équidistants de B' en géométrie radar, tandis que A est plus proche de B que C en géométrie optique.



a. Vue en géométrie de type optique.

b. Image radar prise sous le même angle.

FIGURE 1-16. Simulations d'images d'un modèle numérique de terrain obtenues avec 2SIR¹⁷.



a. Vue en géométrie de type optique.

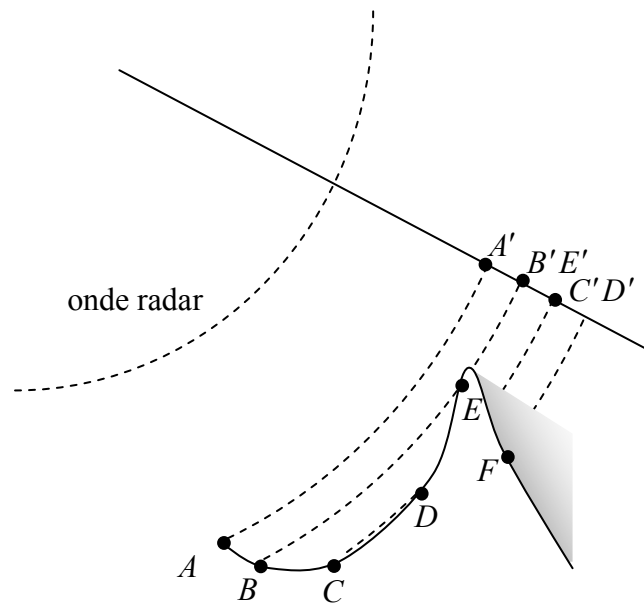
b. Image radar prise sous le même angle.

FIGURE 1-17. Simulations d'images d'une carrière obtenues avec 2SIR.

En revanche, comme en imagerie optique, les points situés dans la zone d'ombre ne fournissent pas d'écho (par exemple F).

¹⁶ *Foreshortening* en anglais.

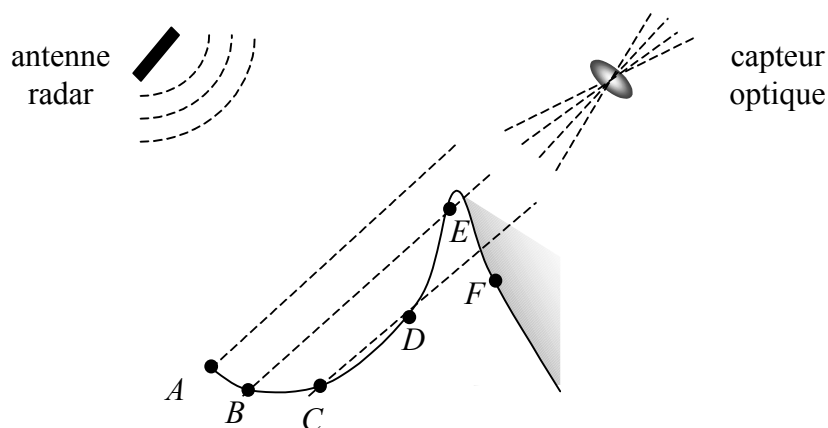
¹⁷ 2SIR : Simulateur d'Images Radar et Simulateur d'Interférogrammes Radar (logiciel développé au cours de ma thèse et décrit dans le paragraphe 5.2).

FIGURE 1-18. *Cibles projetées en géométrie radar.*

1.1.3.2. Analogie avec les systèmes optiques

Cette projection particulière fausse un peu le jugement pour la perception du relief. Il apparaît alors commode d'assimiler le système radar à un système optique équivalent (cf. figure 1-19). En effet, à grande distance :

- Le front de l'onde radar peut être considéré comme plan.
- De même, les divisions angulaires d'un système optique peuvent être assimilées à des parallèles.

FIGURE 1-19. *Analogie entre système radar et système optique.*

Nous pouvons donc considérer que la géométrie radar est équivalente à une géométrie optique où la source d'éclairement est à la place du radar et où l'observateur est placé dans une direction zénithale à 90 degrés de la direction d'éclairement. Toutefois, cette représentation mentale induit en erreur pour la compréhension des phénomènes de repliement. En effet, le point *F* devrait être visible et la zone *B-E* devrait être cachée par le relief. C'est pourquoi l'examen d'une image radar en zone montagneuse donne parfois l'illusion de voir en transparence.

Ainsi, la zone de repliement associée aux arbres de la figure 1-20 est plus lumineuse, non seulement parce qu'elle correspond à la face des arbres tournée vers le radar, mais aussi parce que le signal provenant du sol est superposé à celui provenant des arbres (cf. figure 1-21).

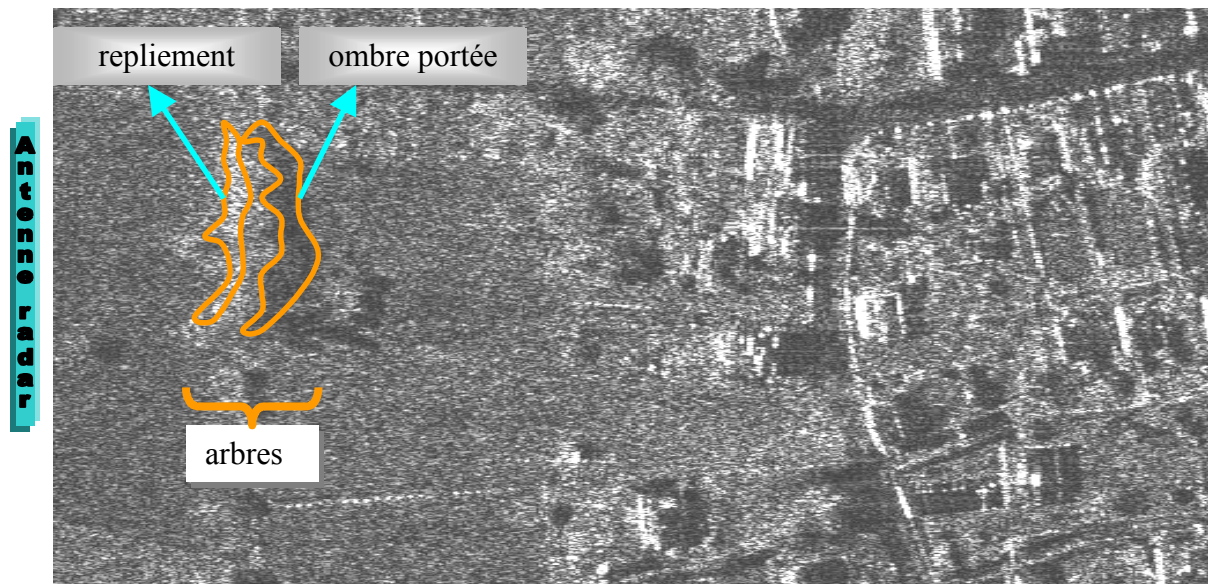


FIGURE 1-20. Exemple de repliement et de masquage dus à des arbres.

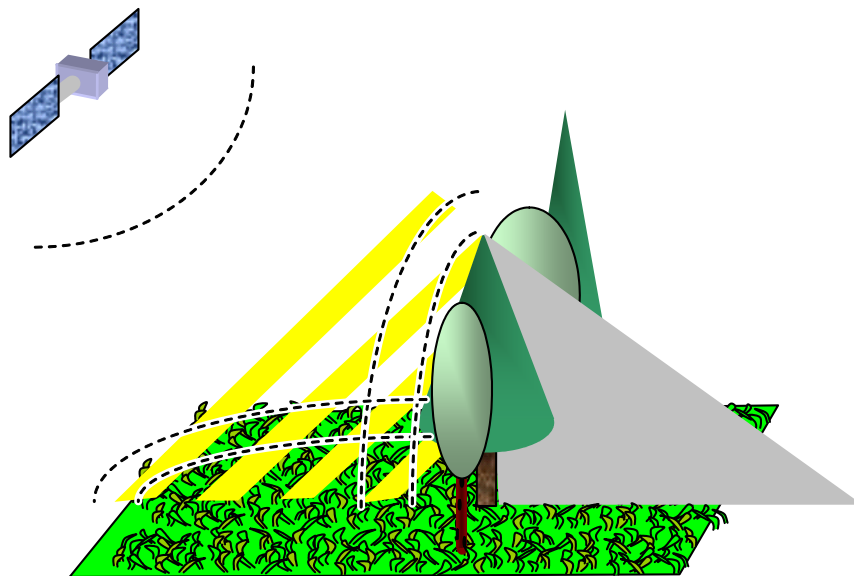


FIGURE 1-21. Illustration des phénomènes de repliement et de masquage pour des arbres.

1.1.4. Reconstruction du relief en imagerie radar

1.1.4.1. Radargrammétrie

Principes et limitation de la radargrammétrie

Cette technique est le pendant de la photogrammétrie en optique. L'image ne contenant pas d'information altimétrique en soi, cette dernière est déduite de la géométrie de l'image. Elle est donc fondée, comme sa consœur, sur des techniques d'appariement entre deux images prises dans des conditions angulaires suffisamment différentes. Les différences de géométrie

entre les deux images sont interprétées comme des effets du relief et de l'observation stéréoscopique.

Inspirées par les succès de la photogrammétrie, les premières bases de cette technique furent rapidement posées par Laprade [Laprade 1963] et amplement développées par Leberl [Leberl 1986][Leberl 1990]. Elle souffre cependant de certains défauts :

- La visée latérale du radar contraint le nombre de configurations aisément traitables. En effet, dans le cas des trajectoires parallèles, soit les deux images sont acquises depuis le même côté de la scène et, dans ce cas, l'angle d'observation stéréoscopique est faible, soit elles sont acquises depuis des positions opposées et, dans ce cas, cet angle est très important et l'appariement est difficile, notamment en raison des occultations.
- Si, *a contrario* de la technique optique, nous maîtrisons parfaitement les conditions d'illumination, la dynamique de la réponse du sol change considérablement avec l'angle d'observation. Les surfaces tournées vers le radar deviennent particulièrement rétrodiffusantes. Cela peut conduire à des appariements erronés.
- Mais la principale contrainte de la radargrammétrie provient du chatoiement. En effet, les techniques d'appariement sont fondées sur une analyse de la texture, or le chatoiement radar produit une texture totalement décorrélée lorsque l'angle d'observation stéréoscopique est important. La première étape du traitement doit donc s'affranchir du chatoiement par un filtrage adéquat. Une partie de la texture est donc perdue et la résolution dégradée.

Cependant, en raison des conditions opérationnelles du radar (vision à travers les nuages et de nuit), cette technique a gagné ses lettres de noblesse.

Technique de reconstruction du relief

La première étape consiste à dresser une carte des disparités entre les deux images projetées en géométrie terrestre. L'altitude de chaque point étant inconnue, la projection est rendue possible en faisant l'hypothèse, dans une première étape, d'un sol plat ou en utilisant un modèle numérique de terrain grossier. La disparité p (cf. figure 1-22) mesure le déplacement de la projection d'un point M entre les deux images.

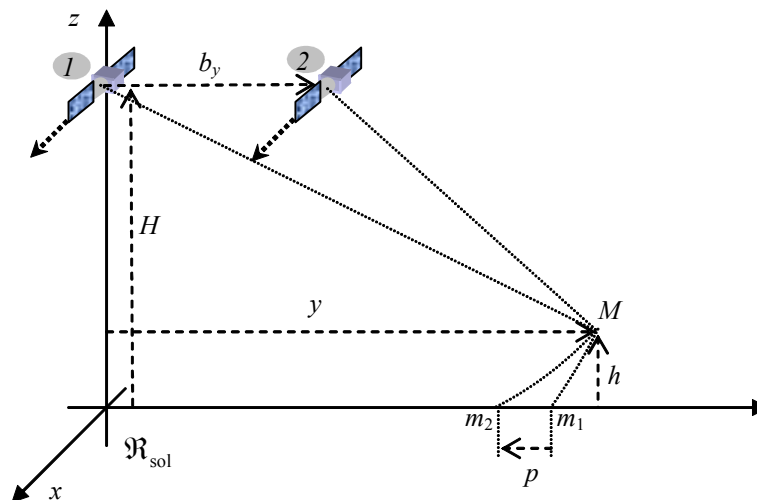


FIGURE 1-22. Géométrie d'acquisition pour la radargrammétrie dans le cadre de la configuration la plus simple : deux trajectoires parallèles situées du même côté de la scène et de même altitude.

Dans ce but, un opérateur de corrélation doit permettre d'apparier les points des deux images. Nous pouvons utiliser l'opérateur classique de corrélation ou employer des opérateurs

spécifiques au radar qui prennent en compte le chatoiement du signal [Nocera 1996]. La carte de disparité peut être dense (utilisation de tous les points de l'image) ou éparse (utilisation de quelques points facilement identifiables).

La disparité est ensuite employée pour déduire l'altitude du point apparié. En imagerie satellitale, les hypothèses et conditions suivantes sont souvent requises pour faciliter le travail de reconstruction :

- Les deux trajectoires d'acquisition sont parallèles et se situent du même côté de la scène.
- La base de stéréovision est horizontale (altitudes des radars identiques).
- L'altitude du radar est suffisamment grande, par rapport aux disparités, pour autoriser les approximations nécessaires à l'équation (1.26).

L'altitude des points appariés peut alors être approchée par l'expression [Maître 2001, page 229]:

$$h = -2p \frac{y(y-b_y)}{H b_y} + 2p^2 \frac{3y^2 - 3y b_y + b_y^2}{H b_y^2} + O^3(p) \quad (1.26)$$

1.1.4.2. Radarclinométrie

Principes et limitations

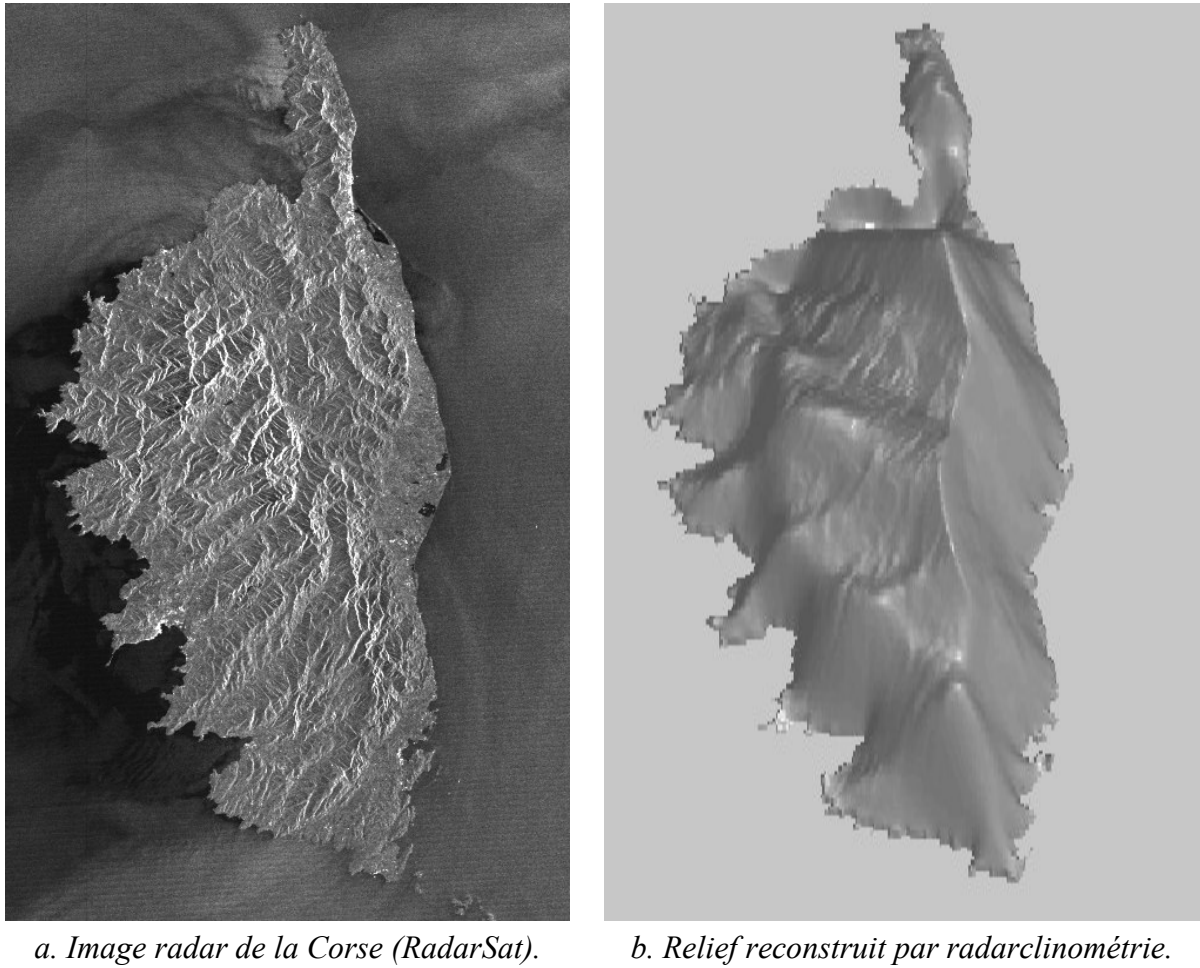
Cette technique est le pendant du *shape from shading*¹⁸ en imagerie radar. Elle a été introduite pour la première fois par Wildey [Wildey 1986]. Le principe de base en est simple : la perception radar est particulièrement sensible à l'angle d'incidence de l'onde sur la surface, il semble donc possible de déduire le relief de la radiométrie d'une seule image (cf. figure 1-23-a). Les postulats de cette technique sont les suivants :

- La surface doit être homogène, du point de vue de la réponse radiométrique et angulaire. Sinon, une carte de la nature du sol et de son comportement radiométrique doit être disponible.
- Il ne doit pas y avoir de zone de repliement (radiométrie non interprétable) ni de zone d'ombre ou de masquage (ces deux types de zones sont généralement confondues en radar). Sinon, ces zones doivent être indexées en tant que zones non utilisables.

La première condition est rarement remplie. Les hypothèses effectuées concernant le modèle de rétrodiffusion sont donc fortes. Cela signifie qu'en pratique, la reconstruction ne peut pas être rigoureuse. Elle peut être satisfaisante d'un point de vue qualitatif (la forme est retrouvée), mais d'un point de vue numérique, les altitudes manquent généralement de précision. De plus, comme en radargrammétrie, le chatoiement vient perturber la mesure. Il est donc nécessaire d'effectuer un filtrage qui, bien sûr, réduit la résolution de l'image.

Cependant, contrairement au cas de la méthode optique (*shape from shading*), la source lumineuse est parfaitement connue et maîtrisée, puisqu'il s'agit du radar lui-même. Aucun fond ambiant ni aucune source secondaire ne vient perturber l'interprétation de la mesure. En outre, la pente du sol joue un rôle déterminant dans l'intensité du signal renvoyé et la nature du sol intervient relativement peu sur le modèle de rétrodiffusion.

¹⁸ *Shape from shading* signifie « forme à partir de l'ombrage ».



a. Image radar de la Corse (RadarSat).

b. Relief reconstruit par radarclinométrie.

FIGURE 1-23. Reconstruction du relief par radarclinométrie (le relief reconstruit provient de la thèse de Pascal Daniel [Daniel 2000]).

Nous pouvons noter, sur la figure 1-23-a, que le relief semble directement lisible sur l'image. En effet, la radiométrie radar est fortement corrélée avec le relief. Cependant, il faut observer que les différences de rugosité induisent également des variations radiométriques comme celles produites par les vents sur la mer : la mer à l'ouest de la Corse est plus sombre qu'à l'est, car elle est protégée du vent par l'île et donc moins rugueuse. Une trace des courants marins est également observable au nord-ouest de l'île, sans que cela puisse être interprétable en termes de relief.

Technique de reconstruction du relief

Si aucune information n'est disponible sur la nature du sol ni sur la dépendance angulaire de son coefficient de rétrodiffusion, une nouvelle hypothèse sur le comportement radiométrique de la surface doit être ajoutée. L'hypothèse la plus élémentaire consiste à supposer que la surface a un comportement lambertien, c'est-à-dire que la luminance observée est la même dans toutes les directions, pour un éclaircissement incident donné. Cette hypothèse conduit à la formulation suivante de l'intensité reçue en fonction des angles de pente α_q et β_{pq} (cf. paragraphe 5.1.3.3) :

$$I_m(\theta, R) = \frac{K}{R^2} \cos(\beta_{pq}) \frac{\cos^2(\theta - \alpha_q)}{\sin(\theta - \alpha_q)} \quad (1.27)$$

Cette formulation est donnée pour une image en géométrie radar. Si celle-ci a été transformée pour correspondre à la géométrie d'un sol plat, il faut la corriger d'un facteur $\sin(\theta)$ au numérateur [Paquerault 1998].

L'inversion du problème n'est pas immédiate, puisque :

- Nous ne disposons que d'une seule information radiométrique I_m pour chaque couple d'inconnues (α_q, β_{pq}) . Le nombre de solutions est donc infini si nous n'imposons pas de contraintes supplémentaires. Des contraintes de continuité et de dérivabilité du relief, ainsi que des conditions aux limites, sont généralement utilisées dans ce but.
- Pour retrouver le relief, une étape d'intégration des pentes est nécessaire¹⁹. La méthode doit s'affranchir au maximum d'une dépendance vis-à-vis du choix du chemin d'intégration, sous peine de conduire à des reconstructions incohérentes.

Certaines méthodes d'intégration sont linéiques. Elles intègrent le relief ligne par ligne puis régularisent le résultat, de façon à rétablir une continuité entre les lignes. D'autres méthodes plus globales permettent une reconstruction plus harmonieuse [Descombes 2001].

Nous proposons en annexe (*cf.* paragraphe 5.1.3.3) une nouvelle formulation de l'équation de la radarclinométrie en fonction des pentes réelles en géométrie cartésienne $p = \frac{\partial z}{\partial x}$ et

$$q = \frac{\partial z}{\partial y} :$$

$$I_m(y, R, p, q) = \frac{K'}{R^3} y \frac{\sqrt{R^2 - y^2} + q y}{y - q \sqrt{R^2 - y^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + p^2} \frac{1 + q^2}{1 + q \sqrt{1 + q^2} + q^2(1 + q^2)}} \frac{1}{\sqrt{1 + q^2}} \left(\frac{\sqrt{R^2 - y^2}}{y} + q \right) \quad (1.28)$$

1.2 Principes et limitations de l'interférométrie ROS

1.2.1. Hypothèses interférométriques

1.2.1.1. Propriétés de la phase radar

Décomposition de la phase radar

La phase du signal reçu mesure un décalage temporel entre l'onde reçue et l'oscillateur local. Elle est donc fonction du temps écoulé entre l'émission du train d'onde et le retour d'un écho. Nous supposons que l'élément observé est modélisable par un élément ponctuel et unique dans le pixel. Nous pouvons théoriquement décomposer la phase en sept termes :

$$\varphi = \varphi_{\text{trajet}} + \varphi_{\text{atmosphérique}} + \varphi_{\text{construction}} + \varphi_{\text{rétrodiffusion}} + \varphi_{\text{instrumentale}} + \varphi_{\text{synthèse}} + \varphi_{\text{bruit}} \quad (1.29)$$

¹⁹ Cette difficulté réapparaîtra lorsque nous aborderons la reconstruction du relief par interférométrie.

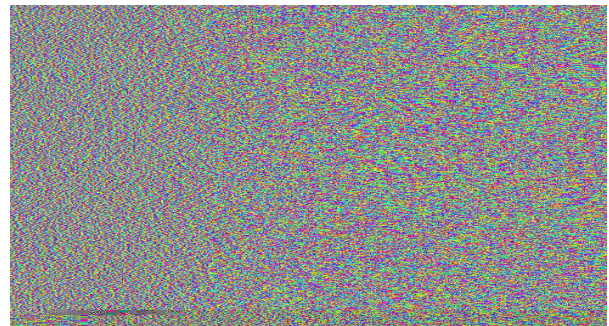
φ_{trajet}	La phase de trajet est le déphasage lié à la distance parcourue par l'onde dans le vide.
$\varphi_{\text{atmosphérique}}$	La phase atmosphérique modélise le retard de phase introduit par des conditions atmosphériques particulières, que ceux-ci soient troposphériques (nuages, éclairs, pluie...) ou ionosphériques (variations de densité électronique).
$\varphi_{\text{construction}}$	La phase de construction sert à modéliser la phase de trajet interne au pixel, résultant de la sommation des échos issus de ce pixel. Elle modélise l'écart de phase induit par la nature étendue, et non ponctuelle, de la cible.
$\varphi_{\text{rétrodiffusion}}$	La phase de rétrodiffusion est le déphasage éventuel introduit au moment de l'interaction avec l'élément de surface. Elle est liée aux propriétés du matériau rétrodiffusant.
$\varphi_{\text{instrumentale}}$	La phase instrumentale est celle produite par le système électronique d'émission et d'acquisition (temps de réponse des amplificateurs et autres dispositifs).
$\varphi_{\text{synthèse}}$	Le traitement de synthèse peut ajouter un terme de phase de synthèse.
φ_{bruit}	Bruit de phase introduit par l'instrumentation et les procédés d'acquisition (numérisation, dérives fréquentielles de la porteuse...).

TABLEAU 1-4. *Décomposition de la phase radar.*

La phase est déduite des projections réelle et imaginaire de la mesure du champ reçu :

$$\varphi = \text{Arg}(I + jQ) + 2\pi m \quad (1.30)$$

Elle n'est donc connue qu'à modulo 2π près. Nous verrons l'importance de ce modulo lors des calculs interférométriques.

a. *Image d'amplitude.*b. *Image de phase.*FIGURE 1-24. *Les deux composantes d'une image radar (AeroSensing, bande X).*

La figure 1-24-b nous donne un exemple d'image de phase. Celle-ci semble avoir un comportement spatial aléatoire. Il apparaît aisément que l'information de phase n'est pas directement exploitable, vu le nombre de termes indéterminés entrant dans sa formulation (1.29). Toutefois, elle reste une source potentielle d'information, si nous pouvons maîtriser une partie de ses termes.

Modélisation des termes de la phase radar

La phase de trajet φ_{trajet} est la composante majeure de la phase²⁰. Elle est liée au chemin optique parcouru par l'onde dans son trajet d'aller-retour. Nous faisons l'approximation que l'indice du milieu traversé est le même que celui du vide. Le retard de phase induit par la présence de l'atmosphère, et plus particulièrement par des structures nuageuses et ionosphériques, est reporté dans le terme $\varphi_{\text{atmosphérique}}$. La phase de trajet se déduit des distances R_a et R_b parcourues (cf. figure 1-25) par la relation :

$$\varphi_{\text{trajet}} = \frac{2\pi}{\lambda} (R_a + R_b) \quad (1.31)$$

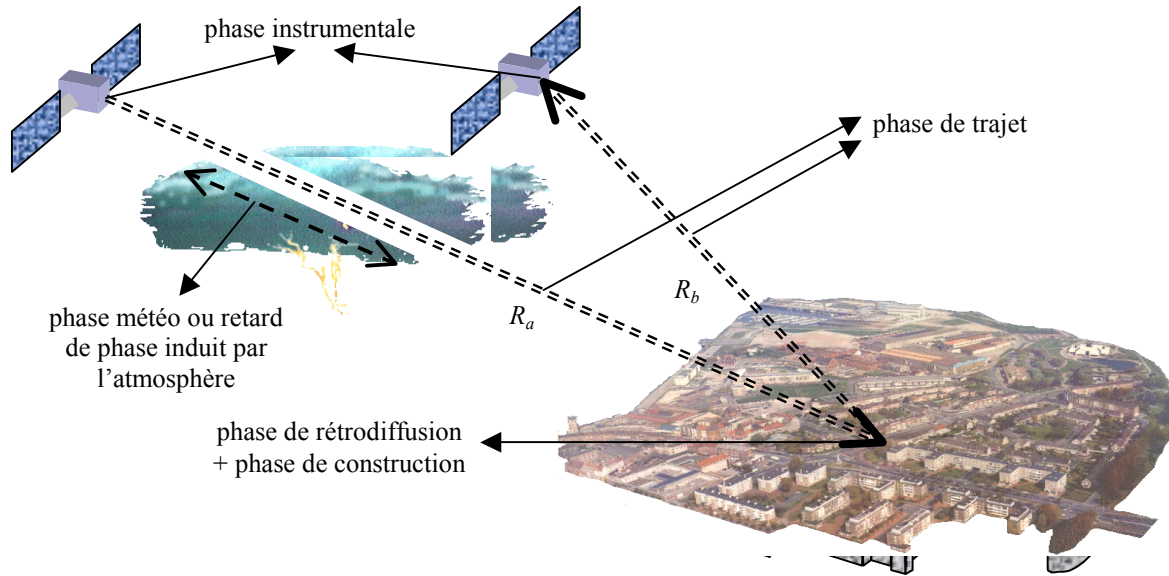


FIGURE 1-25. Illustration des différents termes de phase.

La phase atmosphérique $\varphi_{\text{atmosphérique}}$ se décompose en deux contributions : une composante troposphérique et une composante ionosphérique. La première transcrit réellement les conditions météorologiques du moment de l'acquisition et se calcule par intégration de l'indice de réfraction du milieu le long du trajet. Les variations d'indice sont induites par celles de la température, de la pression ou de la pression de vapeur d'eau et donc des structures nuageuses. La seconde est plus spécifiquement fonction de la densité électronique dans la couche ionosphérique. L'une comme l'autre nécessitent donc une parfaite connaissance de l'état de l'atmosphère pour être estimées.

La phase instrumentale $\varphi_{\text{instrumentale}}$, comme la phase liée au traitement de synthèse $\varphi_{\text{synthèse}}$, sont parfaitement connues et ne posent pas de problème majeur. En revanche, le bruit de phase φ_{bruit} est considéré comme uniforme dans l'image. Il devient donc non négligeable lorsque la radiométrie décroît. Cependant, les instruments sont normalement conçus afin de produire un bruit de phase suffisamment faible pour que l'usage de la phase soit pertinent sur la majorité des surfaces d'intérêt.

En ce qui concerne la phase de construction $\varphi_{\text{construction}}$ et la phase de rétrodiffusion $\varphi_{\text{rétrodiffusion}}$, elles transcrivent des propriétés internes au pixel. La phase de trajet traduisait le

²⁰ Elle devrait représenter (d'après sa formulation) le terme numérique le plus important et rendre les autres termes négligeables. Cependant, il faut garder à l'esprit que nous n'avons accès à sa valeur qu'à modulo 2π près.

chemin parcouru par l'onde jusqu'à la position centrale du pixel. La phase de construction (cf. figure 1-26) traduit la phase résultant de l'addition des parcours internes au pixel (r_1 , r_2 , ...). La phase de rétrodiffusion représente le déphasage moyen introduit par la rétrodiffusion de l'onde au moment de l'interaction avec la surface. Elle n'a véritablement de sens physique que pour les surfaces homogènes.

Le schéma de la figure 1-26 souligne l'apport de la définition de la phase de construction pour les surfaces étendues. Dans cette première approche, la décomposition des termes de phase est fondée sur le fait que l'élément réflecteur est ponctuel et placé au centre du pixel. Une surface étendue induit un écart par rapport à cette hypothèse, que la phase de construction permet d'intégrer simplement. Elle représente le déphasage introduit par la sommation des contributions des réflecteurs internes au pixel.

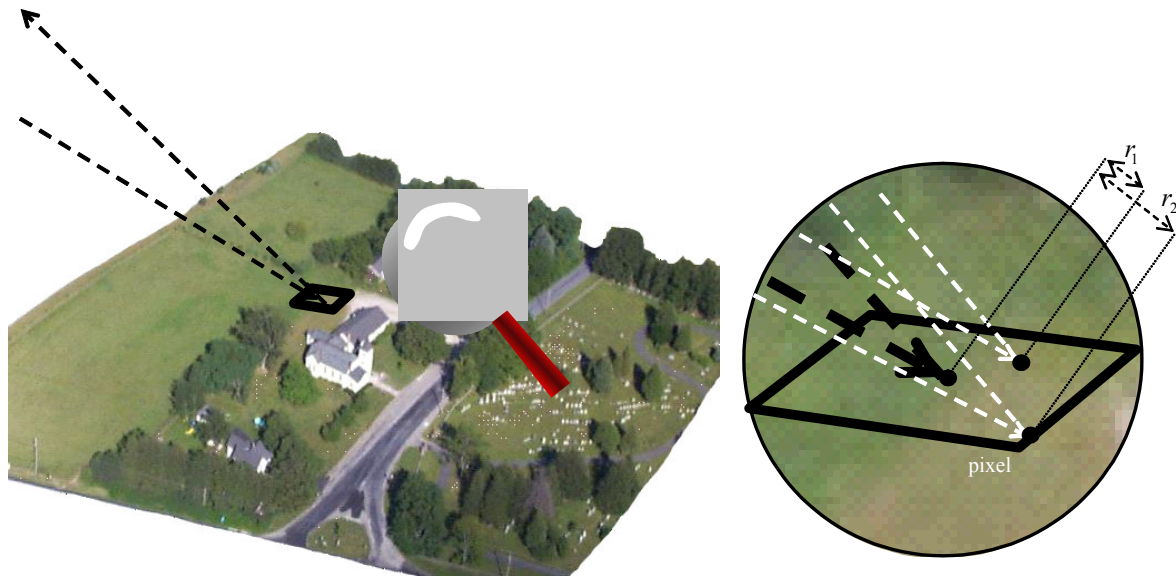


FIGURE 1-26. Illustration de la phase de construction du pixel.

1.2.1.2. Postulats de l'interférométrie

Le but de l'interférométrie est de s'affranchir d'une partie des dépendances de la phase, afin de pouvoir extraire de celle-ci une information pertinente. Le postulat général de l'interférométrie consiste donc à considérer que certains termes sont identiques sur au moins deux acquisitions. Ceci nous permet d'envisager de faire « interférer » numériquement les deux signaux afin de mesurer un déphasage. Ce déphasage peut alors être interprété comme révélateur de propriétés géométriques ou physiques.

Considérons deux acquisitions radar de la même zone, prises dans des conditions angulaires d'observation très proches C_1 et C_2 (elles peuvent être identiques) et à des instants t_1 et t_2 (t_1 peut être égal à t_2). J'énonce les postulats suivants de l'interférométrie :

- **Postulat 1 : les images ont été parfaitement recalées.**

Nous supposons que les images ont été correctement recalées, de façon à ce que chaque paire de pixels des images 1 et 2, de mêmes coordonnées (u, v) , corresponde précisément au même lieu de la scène observée. Dans les conditions interférométriques (postulat 4, voir ci-après), les images sont pratiquement superposables, à une translation près qui peut aisément être estimée de manière globale avec une très grande précision [Maître 2001, page 226].

- **Postulat 2 : les changements de conditions atmosphériques entre les deux acquisitions n'ont qu'un faible impact sur le comportement de la phase.**

Cela signifie qu'il existe un écart maximal $\xi_{\text{atmosphérique}} \ll 2\pi$ tel que, pour tout pixel (u, v) des images 1 et 2 :

$$|\varphi_{\text{atmosphérique}}(u, v, C_2, t_2) - \varphi_{\text{atmosphérique}}(u, v, C_1, t_1) - Cste_{\text{atmosphérique}}| < \xi_{\text{atmosphérique}} \quad (1.32)$$

La constante $Cste_{\text{atmosphérique}}$ signifie que le postulat autorise des changements de conditions atmosphériques, si ceux-ci sont uniformes sur l'image et à condition que le relief soit faiblement marqué. Si le relief est important, les longueurs de trajet de l'onde sont différentes et les changements d'indice de réfraction n'ont pas les mêmes répercussions.

- **Postulat 3 : l'état physique de la scène observée est identique lors des deux acquisitions.**

De la même manière, cela implique qu'il existe un écart maximal $\xi_{\text{rétrodiffusion}} \ll 2\pi$ tel que, pour tout pixel (u, v) des images 1 et 2 :

$$|\varphi_{\text{rétrodiffusion}}(u, v, C_2, t_2) - \varphi_{\text{rétrodiffusion}}(u, v, C_1, t_1)| < \xi_{\text{rétrodiffusion}} \quad (1.33)$$

Ce postulat impose également des contraintes sur la phase de construction, mais il doit être associé au postulat suivant pour définir pleinement ces contraintes.

- **Postulat 4 : les conditions géométriques d'acquisition sont suffisamment proches pour que les trajets des échos internes aux pixels soient sensiblement identiques.**

Ce postulat, couplé avec le postulat 3, permet de supposer qu'il existe un écart maximal $\xi_{\text{construction}} \ll 2\pi$ tel que, pour tout pixel (u, v) des images 1 et 2 :

$$|\varphi_{\text{construction}}(u, v, C_2, t_2) - \varphi_{\text{construction}}(u, v, C_1, t_1)| < \xi_{\text{construction}} \quad (1.34)$$

La technique interférométrique n'a de sens que si la somme $\xi_{\text{atmosphérique}} + \xi_{\text{rétrodiffusion}} + \xi_{\text{construction}}$ est faible devant 2π en valeur absolue, car alors seul le terme φ_{trajet} peut produire une variation de phase inattendue entre les deux acquisitions. Cela signifie que la mesure du déphasage $\varphi_2 - \varphi_1$, entre les pixels de coordonnées (u, v) (ces coordonnées sont omises pour simplifier les notations) des images 1 et 2, permet une mesure fine de la différence de trajet (inférieure à la longueur d'onde, donc de quelques millimètres ou centimètres) :

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_{\text{trajet}}(C_2, t_2) - \varphi_{\text{trajet}}(C_1, t_1) + Cste_{\text{atmosphérique}} + O(\xi_{\text{atmosphérique}} + \xi_{\text{rétrodiffusion}} + \xi_{\text{construction}}) \quad (1.35)$$

Nous pouvons développer les termes de la phase de trajet, d'après l'équation (1.31) :

$$\varphi_{\text{trajet}}(C_2, t_2) - \varphi_{\text{trajet}}(C_1, t_1) = \frac{2\pi}{\lambda} [(R_a(C_2, t_2) + R_b(C_2, t_2)) - (R_a(C_1, t_1) + R_b(C_1, t_1))] \quad (1.36)$$

soit :

$$(R_a(C_2, t_2) + R_b(C_2, t_2)) - (R_a(C_1, t_1) + R_b(C_1, t_1)) = \frac{\lambda}{2\pi} [\varphi_{\text{trajet}}(C_2, t_2) - \varphi_{\text{trajet}}(C_1, t_1)] \quad (1.37)$$

Si nous notons $R_1 = \frac{1}{2}(R_a(C_1, t_1) + R_b(C_1, t_1))$ et $R_2 = \frac{1}{2}(R_a(C_2, t_2) + R_b(C_2, t_2))$:

$$R_2 - R_1 = \frac{\lambda}{4\pi} [\varphi_2 - \varphi_1 - Cste_{\text{atmosphérique}}] + \frac{\lambda}{4\pi} O(\xi_{\text{atmosphérique}} + \xi_{\text{rétrodiffusion}} + \xi_{\text{construction}}) \quad (1.38)$$

1.2.1.3. Cas monostatique et cas bistatique

Les équations précédentes peuvent se décliner selon deux cas spécifiques d'acquisition :

- le cas monostatique : l'antenne émettrice est l'antenne réceptrice.
- le cas bistatique : l'antenne émettrice est différente de l'antenne réceptrice.

Interférométrie dans le cas monostatique

En ce qui concerne les applications interférométriques, le cas monostatique est réalisé par un système bi-passe. Le même capteur va survoler deux fois la zone dans des conditions d'acquisition très proches. Jusqu'à présent, les systèmes satellitaires ont été monostatiques (même ERS1 et ERS2 en mode tandem fonctionnaient en mode monostatique). Les deux images sont générées l'une après l'autre, afin de ne pas produire d'interférences entre les deux radars, qui émettent dans des bandes de fréquences identiques. Nous avons alors :

$$R_a(C_i, t_i) = R_b(C_i, t_i) = R_i \quad (1.39)$$

$$R_2 - R_1 = R_b(C_2, t_2) - R_b(C_1, t_1) \quad (1.40)$$

Interférométrie dans le cas bistatique

C'est un système mono-passe. Deux antennes sont fixées sur le même porteur, une seule est émettrice, mais les deux sont réceptrices. Elles appartiennent forcément au même système radar, puisque la connaissance de l'horloge interne est nécessaire pour la mesure de la phase. Les deux images sont acquises simultanément, mais sous des angles légèrement différents. C'est le cas des systèmes aéroportés ou de certains systèmes spatiaux (navette équipée d'un bras comme la mission SRTM). Si nous considérons que l'image 2 est produite par l'antenne uniquement réceptrice, alors nous avons :

$$R_a(C_1, t_1) = R_b(C_1, t_1) = R_1 \quad (1.41)$$

$$R_a(C_2, t_2) = R_a(C_1, t_1) \quad (1.42)$$

$$R_2 = \frac{1}{2}(R_1 + R_b(C_2, t_2)) \quad (1.43)$$

$$R_2 - R_1 = \frac{1}{2}(R_b(C_2, t_2) - R_b(C_1, t_1)) \quad (1.44)$$

Généralisation

La différence de parcours est donc deux fois plus faible dans le cas bistatique que dans le cas monostatique. Afin de généraliser les équations, nous définissons le paramètre k_{st} , dont la valeur dépend du mode : $k_{st} = 1$ pour le mode monostatique, $k_{st} = 2$ pour le mode bistatique. Si $R_b(C_i, t_i)$ représente la distance réelle de la cible au capteur réalisant l'image i , alors :

$$R_2 - R_1 = \frac{1}{k_{st}}(R_b(C_2, t_2) - R_b(C_1, t_1)) \quad (1.45)$$

1.2.2. Principe de l'interférométrie

1.2.2.1. Calcul interférométrique

Relation théorique entre la différence de trajet et la phase interférométrique

L'idée de l'interférométrie radar consiste à mesurer le déphasage entre deux images, dans les conditions énoncées précédemment, afin de mesurer de faibles variations de trajet de l'onde.

Nous notons comme précédemment \underline{z}_i le signal complexe associé à l'image i :

$$\underline{z}_i = A_i \exp(j\varphi_i) \quad (1.46)$$

Dans le cas où les signaux sont déterministes, nous pouvons définir l'interférogramme complexe entre les images 1 et 2 par le rapport suivant :

$$\underline{I}_{\text{déterministe}} = \frac{\underline{z}_2 \underline{z}_1^*}{\sqrt{\underline{z}_1 \underline{z}_1^*} \sqrt{\underline{z}_2 \underline{z}_2^*}} \quad (1.47)$$

Cependant, les signaux sont généralement bruités et l'expression déterministe est remplacée par sa généralisation statistique, auquel cas l'interférogramme complexe \underline{I} se définit à partir des espérances mathématiques des produits complexes (l'argument de \underline{I} est appelé « interférogramme ») :

$$\underline{I} = \frac{E[\underline{z}_2 \underline{z}_1^*]}{\sqrt{E[\underline{z}_1 \underline{z}_1^*]} \sqrt{E[\underline{z}_2 \underline{z}_2^*]}} \quad (1.48)$$

L'expression (1.47) donne :

$$\underline{I}_{\text{déterministe}} = \frac{A_2 \exp(j\varphi_2) A_1 \exp(-j\varphi_1)}{\sqrt{A_1^2} \sqrt{A_2^2}} \quad (1.49)$$

$$\underline{I}_{\text{déterministe}} = \exp(j(\varphi_2 - \varphi_1)) \quad (1.50)$$

Dans le cadre des postulats interférométriques, nous avons, en utilisant (1.35) :

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_{\text{trajet}}(C_2, t_2) - \varphi_{\text{trajet}}(C_1, t_1) + Cste_{\text{atmosphérique}} + O(\xi_{\text{atmosphérique}} + \xi_{\text{rétrodiffusion}} + \xi_{\text{construction}}) \quad (1.51)$$

La phase de $\underline{I}_{\text{déterministe}}$ nous donne donc la différence de phase $\varphi_{\text{trajet}}(C_2, t_2) - \varphi_{\text{trajet}}(C_1, t_1)$, à une constante et un terme parasite près. Si nous assimilons les contributions indésirables à un bruit blanc aléatoire, la différence de phase de trajet peut être tirée de \underline{I} de manière exacte (l'écart aux conditions idéales est nul, au contraire d'une formulation fondée sur $\underline{I}_{\text{déterministe}}$) :

$$\varphi_{\text{trajet}}(C_2, t_2) - \varphi_{\text{trajet}}(C_1, t_1) = \text{Arg}(\underline{I}) + m2\pi - Cste_{\text{atmosphérique}} \quad (1.52)$$

Le terme $m2\pi$ est introduit pour signifier que l'argument ne permet de retrouver la valeur de la phase qu'à modulo 2π près. D'après l'équation (1.37), nous avons donc :

$$R_2 - R_1 = \frac{\lambda}{4\pi} \left[\text{Arg} \left(\frac{E[\underline{z}_2 \underline{z}_1^*]}{\sqrt{E[\underline{z}_1 \underline{z}_1^*]} \sqrt{E[\underline{z}_2 \underline{z}_2^*]}} \right) + m2\pi - Cste_{\text{atmosphérique}} \right] \quad (1.53)$$

Ainsi, nous avons une mesure fine de la différence de distance $R_2 - R_1$, à une constante près.

Définition de la cohérence

La cohérence se définit comme le module de l'interférogramme complexe :

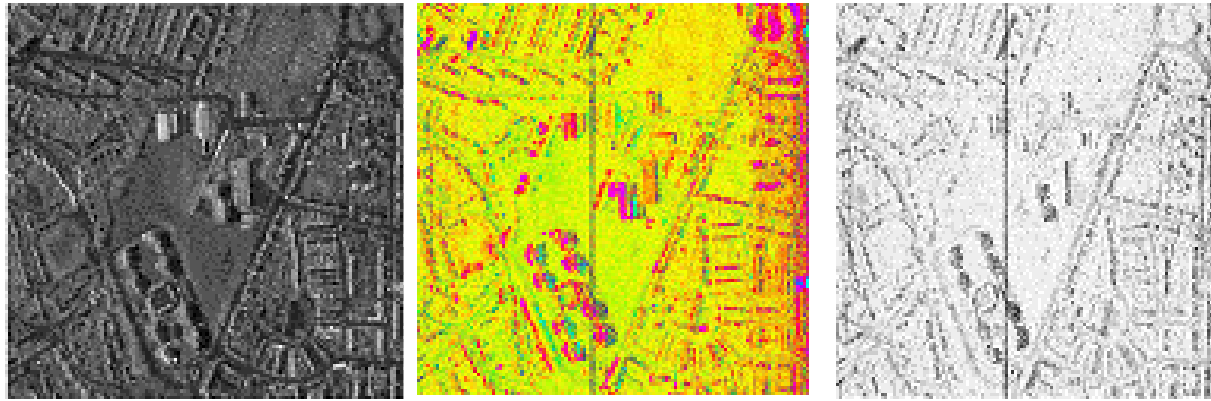
$$\gamma = \frac{|E[\underline{z}_2 \underline{z}_1^*]|}{\sqrt{E[\underline{z}_1 \underline{z}_1^*]} \sqrt{E[\underline{z}_2 \underline{z}_2^*]}} \quad (1.54)$$

Il s'agit du coefficient de corrélation normé entre les deux signaux complexes supposés centrés (de moyenne nulle). La cohérence réalise donc une mesure de la qualité interférométrique, puisque sa valeur est 1 si les hypothèses interférométriques sont idéalement respectées (signaux parfaitement déterministes). En revanche, ce terme tend vers 0 si la contribution aléatoire des termes parasites est forte.

Exemple d'interférogramme

Les figures 1-27, donnent un exemple de calcul interférométrique réalisé avec un couple d'images aéroportées obtenues en mode stéréoscopique (images RAMSES). Nous pouvons

noter que la phase de l'interférogramme (cf. figure 1-27-b) tourne très lentement sur l'image (d'autant que la dynamique de variation des couleurs qui représentent la phase a été accrue) et que la cohérence interférométrique est élevée (cf. figure 1-27-c). Nous verrons que c'est un comportement typique des capteurs aéroportés.



a. Amplitude de l'image radar.

b. Phase interférométrique codée selon la teinte avec une dynamique accrue.

c. Cohérence interférométrique.

FIGURE 1-27. Image radar, interférogramme et cohérence obtenues à partir d'un couple d'images RAMSES.

1.2.2.2. Interférométrie différentielle

Conditions d'acquisition

Historiquement, l'interférométrie différentielle fut la première application de la technique interférométrique, dont un des premiers succès fut l'étude du tremblement de terre de Landers en 1993 [Massonnet 1993a][Massonnet 1994], grâce au satellite ERS-1. Le principe est d'obtenir deux acquisitions non simultanées d'une même scène, dans des conditions géométriques d'acquisition C_1 et C_2 identiques. Selon les postulats interférométriques, les phases mesurées doivent être identiques, sauf si la surface s'est déplacée. Le déplacement peut être estimé grâce à la différence de phase de trajet. Cela signifie que nous pouvons cartographier et mesurer des déplacements avec une précision inférieure à la longueur d'onde.

Cette technique implique donc deux nouvelles contraintes, en sus des postulats interférométriques :

- Nous devons disposer d'au moins une acquisition avant et une après le déplacement étudié (l'écart $t_2 - t_1$ doit être non nul, voire important si la vitesse du déplacement est faible).
- Les conditions géométriques d'acquisition C_1 et C_2 doivent être identiques ($C_1 \equiv C_2$) ou très proches. Il s'agit d'une restriction du postulat 4. Si les conditions ne sont pas identiques, un modèle numérique de terrain (même grossier) sera requis pour éliminer les franges produites par le relief (cf. paragraphe 1.2.2.3).

Nous pouvons noter que le système doit, de toute évidence, être monostatique.

Théorie

Considérons un déplacement du sol de $\overrightarrow{D_v}$ (sur la figure 1-28, le déplacement représenté est vertical, mais il pourrait être quelconque). Une fois les deux images interférométriques

recalées, le déphasage produit ne permet de mesurer que la projection $\overrightarrow{D_R}$ du déplacement selon l'axe radar d'éclairage $\overrightarrow{Z_R}$, puisque, d'après (1.45) :

$$R_2 - R_1 = -\overrightarrow{D_R} \cdot \overrightarrow{Z_R} = -\overrightarrow{D_V} \cdot \overrightarrow{Z_R} \quad (1.55)$$

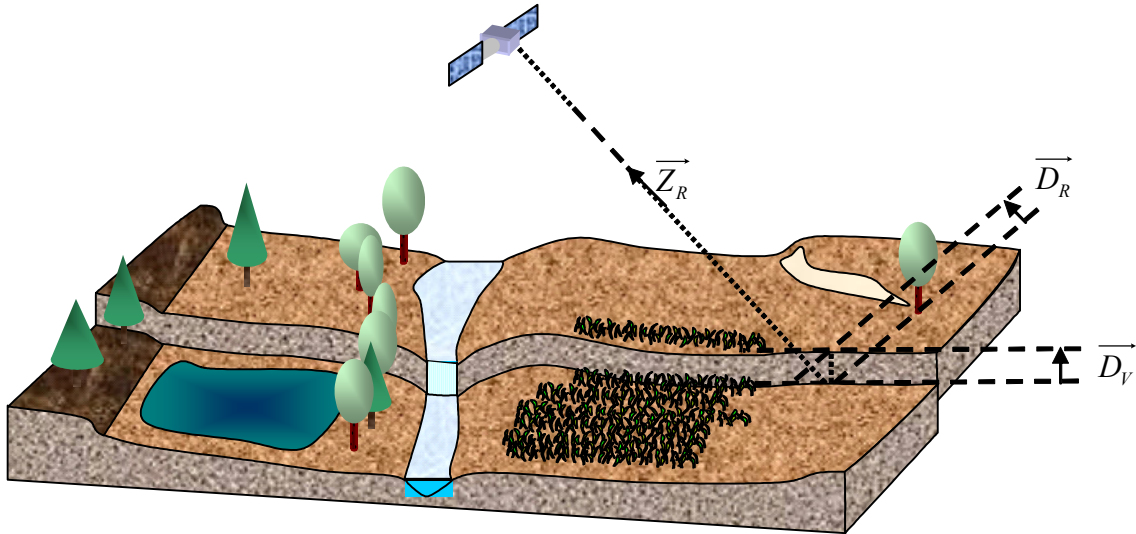


FIGURE 1-28. *Mesure de déplacement du sol par interférométrie différentielle.*

Nous obtenons donc l'expression d'une des composantes du déplacement en fonction du déphasage, puisque d'après (1.53) :

$$\overrightarrow{D_V} \cdot \overrightarrow{Z_R} = -\frac{\lambda}{4\pi} \left[\text{Arg} \left(\frac{E[z_2 z_1^*]}{\sqrt{E[z_1 z_1^*] E[z_2 z_2^*]}} \right) + m 2\pi - Cste_{\text{atmosphérique}} \right] \quad (1.56)$$

Un modèle et des contraintes supplémentaires sont nécessaires pour retrouver les autres composantes du déplacement. Cependant, si aucune précision additionnelle n'est disponible concernant l'état de l'atmosphère lors des acquisitions, nous ne pouvons mesurer que des mouvements relatifs entre zones de terrain voisines.

Applications

L'interférométrie différentielle permet donc une mesure précise et dense des déplacements du sol, avec une répétitivité importante et une mise en œuvre aisée. C'est pourquoi elle est maintenant couramment employée pour étudier différents mouvements de surfaces :

- **Gonflement et déflation de volcans** [Massonnet 1995, Massonnet 1998].
- **Mouvements de glaciers** [Massonnet 1998].
- **Subsidences du sol.** Les mouvements de faible ampleur peuvent être étudiés sur des périodes très longues, lorsque des coins réflecteurs fortuits et très cohérents dans le temps sont présents dans la zone étudiée, ce qui est généralement le cas en milieu urbain : subsidences sur Paris [Fruneau 2000] ; subsidences sur Bologne en Italie [Costantini 2000].
- **Séismes, tremblements de terre.** La figure 1-29 donne en exemple un des interférogrammes générés par le CNES (avec la participation de votre rédacteur) après le séisme d'Izmit en Turquie en juillet 1999. La luminance code l'amplitude de l'image radar, la teinte représente la phase interférométrique et la saturation indique le niveau de cohérence. Chaque frange traduit un déplacement du sol de 5 centimètres dans la direction

du radar. La densité et la précision de cette mesure permettent aux géomorphologues d'ajuster leurs modèles [Sarti 1999].

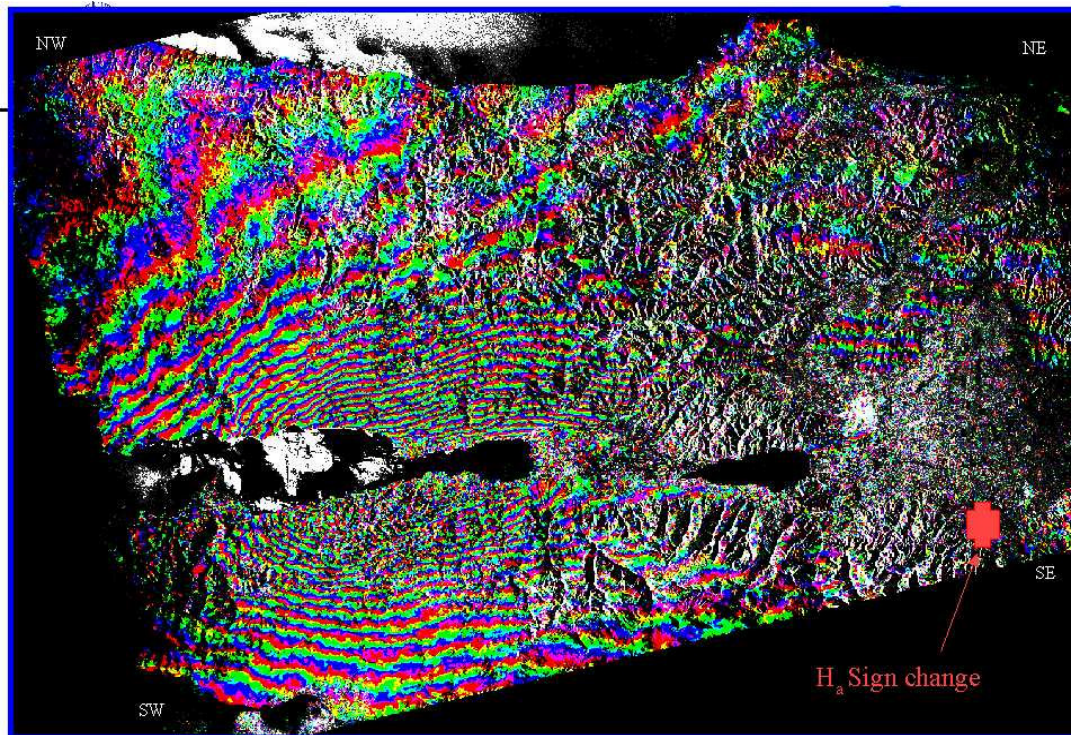


FIGURE 1-29. *Franges interférométriques produites par un mouvement de terrain : tremblement de terre d'Izmit en Turquie (juillet 1999) observé par ERS 1 et 2.*

1.2.2.3. Interférométrie stéréoscopique

Conditions d'acquisition

Puisque l'interférométrie permet une mesure fine de la différence de trajet, il apparaît possible d'étudier plus précisément la géométrie d'une scène, si une paire d'images, prises dans des conditions favorables de triangulation, est disponible [Graham 1974, Madsen 1993, Madsen 1996]. La stéréoscopie fournit une troisième composante (en l'occurrence angulaire) pour localiser un pixel dans l'espace, et nous pouvons envisager de reconstruire un relief en trois dimensions.

Cette seconde technique implique deux nouvelles hypothèses, en sus des postulats interférométriques, qui sont inverses de celles nécessaires à la technique différentielle :

- Les conditions géométriques d'acquisition C_1 et C_2 doivent être légèrement différentes, de façon à donner une vue stéréoscopique de la scène. Cependant, l'angle d'observation stéréoscopique nécessaire doit être faible, *a contrario* des techniques optiques (quelques centièmes de degré au lieu de plusieurs degrés).
- Les acquisitions doivent être effectuées dans des conditions atmosphériques strictement identiques, et aucun changement, même infime, ne doit s'être produit dans la scène (le cas idéal est donc celui où $t_1 = t_2$). Dans le cas contraire, les informations concernant ces différences de situation doivent être disponibles afin d'en corriger les effets.

Bien que les systèmes bistatiques soient particulièrement adaptés à ce genre d'applications, les systèmes monostatiques restent également envisageables.

Théorie

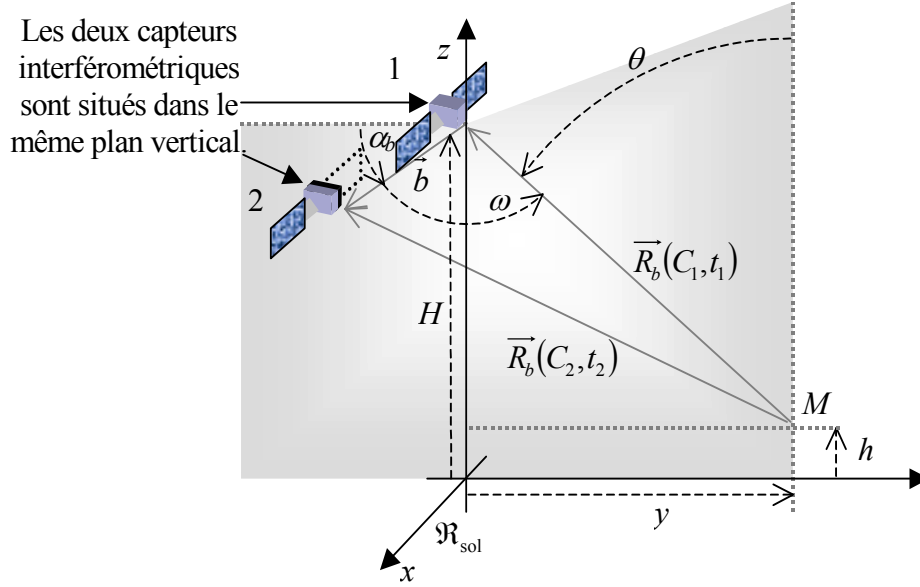


FIGURE 1-30. Différence de distance entre deux capteurs interférométriques et un point au sol, dans un repère cartésien.

Nous noterons pour simplifier :

$$\vec{R}_{bi} = \vec{R}_b(C_i, t_i) \quad (1.57)$$

La figure 1-30 permet de décomposer la différence $R_{b2} - R_{b1}$ en fonction de la ligne de base \vec{b} (vecteur de déplacement du radar entre les deux prises de vue) :

$$R_{b2} - R_{b1} = \|\vec{R}_{b2}\| - \|\vec{R}_{b1}\| = \|\vec{R}_{b1} + \vec{b}\| - \|\vec{R}_{b1}\| \quad (1.58)$$

D'après les approximations décrites en annexe (cf. paragraphe 5.3.1) :

$$R_{b2} - R_{b1} = -b \cos(\omega) + \frac{b^2}{2R_{b1}} \sin^2(\omega) + R_{b1} O^3\left(\frac{b}{R_{b1}}\right) \quad (1.59)$$

Pour l'ensemble des systèmes interférométriques connus, l'erreur introduite par le dernier terme est inférieure à $5.10^{-5} m$. Nous avons la relation suivante entre les angles :

$$\omega = \frac{\pi}{2} + \theta - \alpha_b \quad (1.60)$$

d'où :

$$R_{b2} - R_{b1} = b \sin(\theta - \alpha_b) + \frac{b^2}{2R_{b1}} \cos^2(\theta - \alpha_b) + R_{b1} O^3\left(\frac{b}{R_{b1}}\right) \quad (1.61)$$

D'après (1.45) :

$$R_2 - R_1 = \frac{1}{k_{st}} (R_{b2} - R_{b1}) = \frac{1}{k_{st}} \left(b \sin(\theta - \alpha_b) + \frac{b^2}{2R_{b1}} \cos^2(\theta - \alpha_b) + R_{b1} O^3\left(\frac{b}{R_{b1}}\right) \right) \quad (1.62)$$

En utilisant (1.53), nous en déduisons une relation entre phase interférométrique, ligne de base et angle d'incidence sur un sol supposé plat :

$$\frac{1}{k_{st}} \left(b \sin(\theta - \alpha_b) + \frac{b^2}{2R_{b1}} \cos^2(\theta - \alpha_b) \right) \approx \frac{\lambda}{4\pi} \left[\text{Arg} \left(\frac{E[z_2 z_1^*]}{\sqrt{E[z_1 z_1^*] E[z_2 z_2^*]}} \right) + m 2\pi - Cste_{\text{atmosphérique}} \right] \quad (1.63)$$

Selon le cas et la précision visée, l'approximation au premier ordre peut être suffisante :

$$\frac{1}{k_{st}} b \sin(\theta - \alpha_b) \approx \frac{\lambda}{4\pi} \left[\text{Arg} \left(\frac{E[z_2 z_1^*]}{\sqrt{E[z_1 z_1^*] E[z_2 z_2^*]}} \right) + m 2\pi - Cste_{\text{atmosphérique}} \right] \quad (1.64)$$

Dans cette équation, tous les termes sont connus ou mesurables, excepté l'angle θ qui peut donc être déduit. Il faut noter que cet angle est défini dans le repère cartésien dont la verticale passe par le premier capteur. Dans un référentiel terrestre, cet angle doit être corrigé des effets de la rotondité terrestre. Les courbes d'iso-phase interférométrique découpent l'espace angulairement et fournissent la troisième coordonnée nécessaire à la localisation d'un point dans un espace à trois dimensions. La précision Δ_θ obtenue angulairement (qui se déduit de la précision obtenue sur la phase interférométrique), ainsi que les résolutions en distance et en azimuth circonscrivent le point M dans un petit volume (cf. figure 1-31).

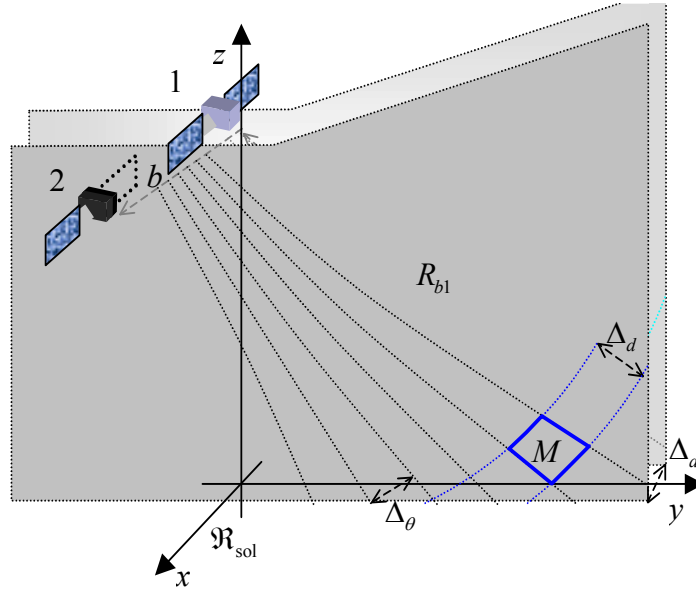


FIGURE 1-31. Localisation dans l'espace d'une cible ponctuelle par interférométrie radar.

Nous obtenons l'altitude du point M (dans le repère cartésien de la figure 1-30) :

$$h = H - R_{b1} \cos(\theta) \quad (1.65)$$

Applications

L'interférométrie stéréoscopique permet donc de reconstruire le relief. Elle bénéficie, par rapport aux autres techniques de reconstruction « 3D », de deux avantages :

- Par rapport à la radargrammétrie, l'étape d'appariement est inexistante : un simple recalage global avec une déformation lente est requis.
- Par rapport à la radarclinométrie, la technique est assez peu sensible aux propriétés radiométriques du matériau et, de surcroît, aux conditions d'éclairement.

En revanche, les postulats interférométriques doivent être scrupuleusement respectés, ce qui rend la technique difficilement exploitable en acquisition non simultanée. Les systèmes aéroportés sont donc généralement plus performants, puisque les systèmes satellitaires équipés d'antennes en conditions stéréoscopiques sont rares. La mission américaine SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) a effectué une couverture de 80% des terres émergées avec une précision verticale d'environ 6 m (6 mètres en bande X sur une partie de la terre, 16 mètres en bande C pour 80% des terres émergées). La figure 1-32 donne un exemple d'interférogramme calculé par le DLR, à partir des données radar de cette mission, pour un relief de l'Arizona.

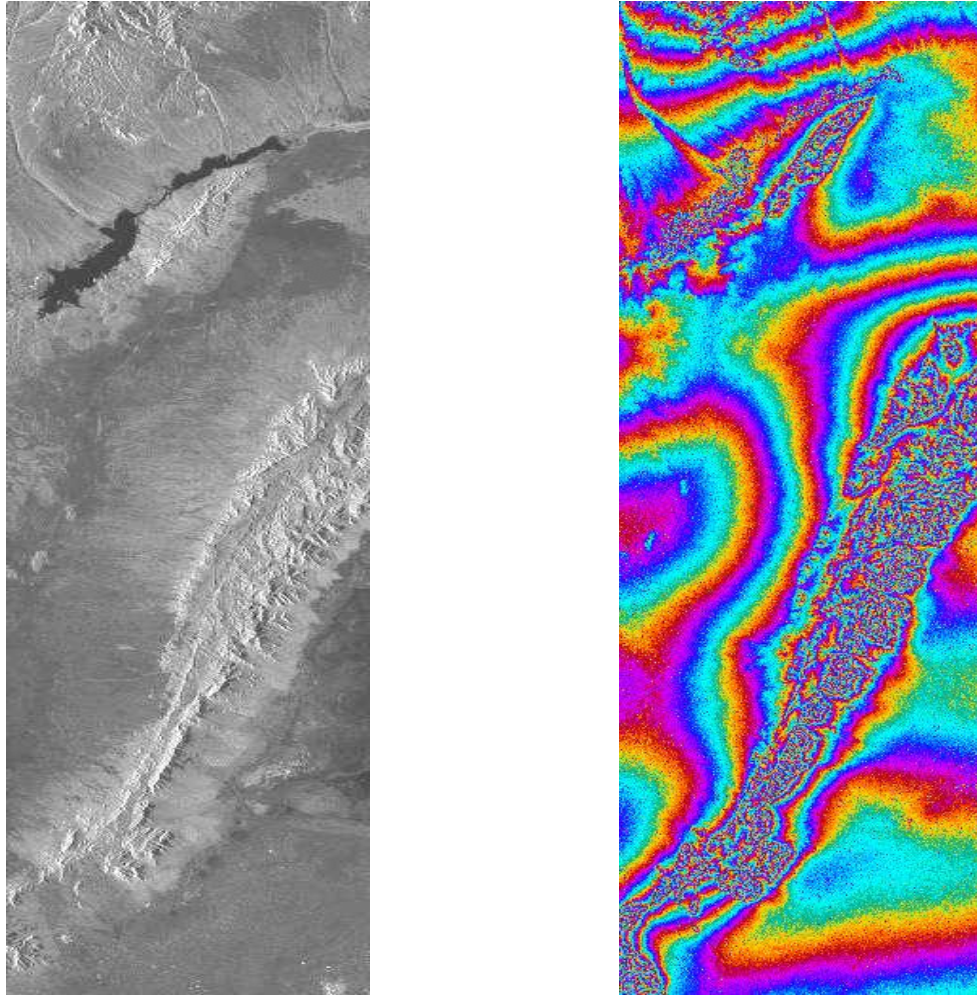


FIGURE 1-32. *Franges interférométriques produites par un relief situé au sud d'Albuquerque, en Arizona (mission SRTM, NASA, JPL) : image d'amplitude et interférogramme.*

1.2.2.4. Cohérence interférométrique

La cohérence interférométrique est le module de l'interférogramme complexe (1.54). Elle mesure la stationnarité de la phase sur un ensemble d'échantillons. Son estimation requiert des hypothèses sur l'ergodicité et la stationnarité du signal [Touzi 1998], c'est-à-dire que nous supposons que nous disposons localement, sur l'image, d'un ensemble d'échantillons représentatifs et suffisants pour substituer la moyenne spatiale à la moyenne ensembliste :

$$\tilde{\gamma} = \frac{\left| \langle z_2 z_1^* \rangle \right|}{\sqrt{\langle z_1 z_1^* \rangle \langle z_2 z_2^* \rangle}} \quad (1.66)$$

Ces hypothèses ont un impact sur le sens de cette grandeur selon le type d'application. Dans le cas de l'interférométrie différentielle quatre cas sont envisageables :

- La scène ne change pas entre les deux acquisitions (et les conditions de l'interférométrie différentielle sont remplies). Excepté les effets liés à l'atmosphère, la phase doit être invariante à une constante près. La cohérence est donc uniforme et sa valeur numérique est 1.
- Il y a eu un mouvement de surface (séisme, avancée de glacier, affaissement du sol...). Le phénomène est de grande ampleur et peut être considéré comme localement uniforme. La cohérence est proche de 1.
- Il y a eu d'importantes modifications de la surface (glissement de terrain, zone proche du séisme...). La différence de phase varie rapidement dans l'espace. L'estimateur de cohérence donne une valeur faible.
- Il n'y a pas eu de réels mouvements de surface mais des modifications de sa composition interne, par rapport à la taille du pixel (mouvement des feuilles des arbres, déplacement d'un véhicule ou d'un être vivant, moisson d'une récolte...). Dans ce cas, les postulats interférométriques 3 et 4 ne sont plus respectés, puisque les phases de construction et de rétrodiffusion ne sont plus identiques. La phase mesurée n'a plus aucun lien entre les deux images et la phase interférométrique a un comportement spatial stochastique. La cohérence tend donc vers 0.

Il en résulte que la cohérence est un excellent indicateur des changements intervenus au niveau de la surface, puisque la moindre modification (centimétrique) de sa surface affectera la phase, même si elle n'affecte pas l'amplitude. Ainsi, les sillons produits par le passage d'un tracteur dans un champ n'apparaissent pas forcément sur une image optique ou d'amplitude radar à haute résolution, tandis que la cohérence ne laisse aucun doute sur leur présence. Ainsi, la cohérence permet aisément de reconnaître les points d'eau (totalement incohérents entre deux acquisitions), de séparer des champs de cultures différentes, d'indiquer si des moissons ont été faites...

En revanche, en interférométrie stéréoscopique, ce sont les hypothèses de continuité de la surface qui garantissent une certaine stationnarité de la phase interférométrique. Le système est généralement calibré afin que le relief n'induisse pas de variations trop brutales de la différence de phase, compte tenu de la résolution. Cependant, si le relief est très « chahuté », la phase varie rapidement et la cohérence est faible. Ces variations brutales de la phase interférométrique compliquent considérablement la reconstruction du relief, et réduisent d'autant la qualité du résultat obtenu. La cohérence est donc généralement employée comme estimateur de la qualité interférométrique et donc du résultat escompté.

1.2.3. Limitations de l'interférométrie

1.2.3.1. Ambiguïtés interférométriques

Nous avons vu, avec l'égalité (1.29), que de nombreux termes interviennent dans la construction de la phase. Les applications interférométriques sont fondées sur des situations où une partie de ceux-ci sont connus ou maîtrisés. Mais comme ce n'est pas toujours le cas, la phase interférométrique est d'autant plus ambiguë.

Ambiguïté due à l'atmosphère

Dans le cas où les acquisitions ne sont pas effectuées simultanément, l'état de l'atmosphère a une incidence sur la valeur de la mesure interférométrique et met à rude épreuve le postulat 2. Cependant, ce défaut peut être amoindri si plusieurs couples d'images sont disponibles, avant et après l'événement ou pour les deux angles de l'observation

stéréoscopique. En effet, nous pouvons supposer que les perturbations atmosphériques sont décorréliées entre les images et donc nous pouvons soustraire leurs effets par analyse corrélative [Sarti 1998].

Dans le cadre de cette thèse, je suis affranchi de cette difficulté, puisque toutes les données traitées sont acquises simultanément par des systèmes aéroportés.

Ambiguïté entre mouvement et relief

Même si les postulats interférométriques sont respectés, si les conditions d'acquisition ne sont pas optimales pour l'application visée, l'interprétation de la phase est ambiguë :

- Les images n'ont pu être acquises exactement sous le même angle : l'interférométrie différentielle est perturbée par les franges induites par le relief.
- Les images n'ont pu être acquises simultanément : toute modification de la surface génère une variation de phase qui peut être interprétée à tort comme du relief, mais qui surtout dégrade considérablement la cohérence du signal.

De nouveau, du fait de la simultanéité et du type d'application visée (la reconstruction du relief), cette ambiguïté n'apparaît pas dans mes données.

Ambiguïté du modulo

La phase interférométrique n'est connue qu'à modulo 2π près. Or sa valeur réelle est nécessaire pour en déduire le déplacement ou le relief. Ainsi, dans le cas du traitement stéréoscopique, le découpage par la phase du relief en tranches d'iso-altitude (en première approximation et après quelques traitements) n'est connu que modulo l'altitude correspondant à un « tour de phase » (cf. figure 1-33). Pour s'affranchir de cette difficulté, une hypothèse supplémentaire est faite : les variations de la phase interférométrique entre deux pixels adjacents sont inférieures à π en module. Cette hypothèse permet d'établir une condition de continuité de la surface, et il est alors possible de « dérouler » la phase (cf. figure 1-33).

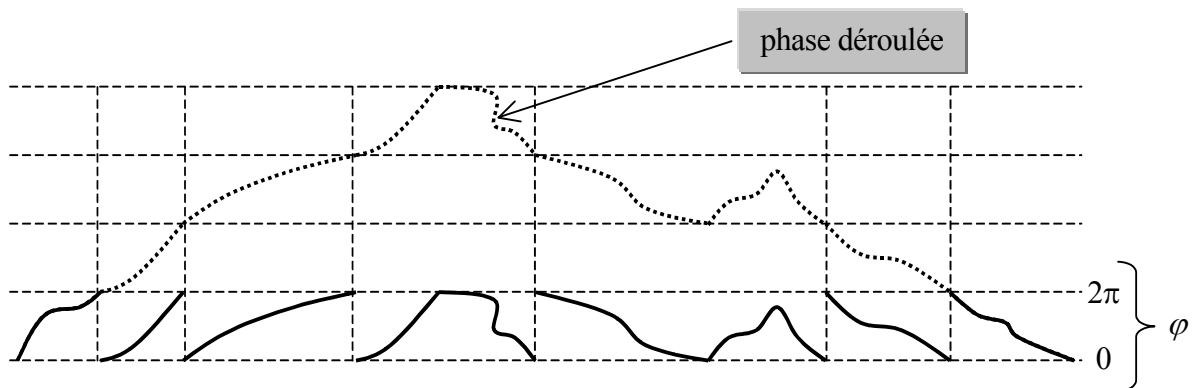


FIGURE 1-33. Déroulement de la phase sur un relief.

Encore une fois, les données traitées dans cette thèse ne présentent guère ce type de problème, puisque l'angle d'observation stéréoscopique des acquisitions aéroportées est faible. En outre, les reliefs étudiés sont peu importants (de l'ordre de la vingtaine de mètres, c'est-à-dire moins d'un tour de phase), bien que torturés. Les variations de phase sont donc très lentes ou peu importantes sur l'image et aucun déroulement de phase n'est requis.

Ambiguïtés dues aux rebonds multiples

Nous savons que l'onde radar est très sensible à la pente et à la rugosité de la surface. Or de nombreuses surfaces ont un comportement spéculaire marqué. En outre, en milieu urbain,

la présence de nombreux angles droits est source de nombreux phénomènes cohérents de réflexions multiples. Quatre cas peuvent être différenciés :

- Les doubles et triples rebonds produits par les coins et angles droits, qui peuvent être assimilés à des coins réflecteurs. Ils produisent des échos forts, parfaitement localisables et fiables. Ils ne sont pas directement source d’ambiguïté.
- Les doubles rebonds engendrés par des surfaces planes et peu rugueuses. Chaque élément réfléchissant de l’environnement immédiat a une réplique sur la surface, projection à angle droit de l’élément.
- Les triples rebonds produits par des objets fortement rétrodiffusants à proximité d’une surface plane et peu rugueuse. Les surfaces se comportent comme des miroirs et produisent une image inversée de ces objets par rapport à la surface, du point de vue de la forme, de la localisation et de la phase.
- Les rebonds multiples, qui sont difficilement identifiables et interprétables lorsqu’ils sont supérieurs à trois, même s’ils restent cohérents.

Tous ces phénomènes ont d’importants impacts sur les cas que j’ai traités, comme cela est décrit dans le chapitre 4.

1.2.3.2. Écart au postulat 4 (ou principe du décalage spectral)

Lors des traitements interférométriques, nous avons considéré jusqu’à présent que l’onde était monochromatique et que le postulat 4 était toujours respecté. Or nous savons que le pouvoir résolvant du radar est inhérent à la bande passante du signal (il n’est donc pas monochromatique) et qu’en outre, la phase de construction est susceptible d’être affectée par les variations de conditions géométriques d’acquisition. Nous allons en étudier les effets sur le traitement interférométrique.

Le principe associé à ces effets est appelé « principe du décalage spectral ». Il a déjà été démontré par Prati *et al* [Prati 1993], mais je propose ici une approche légèrement différente.

Contrainte sur la phase de construction

Nous supposons que la surface est localement plane et que nous pouvons la discrétiser en éléments réflecteurs ponctuels (hypothèses de Goodman, qui seront amplement étudiées dans le chapitre 2.3.1.1). Nous associons à chaque réflecteur une amplitude a_n et une phase de trajet φ_n . Les autres termes de phase sont ignorés car ils sont présumés constants ou négligeables (nous supposons que les acquisitions sont simultanées ou qu’aucun changement n’est apparu dans la scène). La phase de construction se déduit de la phase de la somme des contributions des N réflecteurs :

$$\varphi_{\text{construction}} = \text{Arg} \left(\sum_{n=1}^N a_n e^{j\varphi_n} \right) - \varphi_{\text{trajet}}(P) \quad (1.67)$$

D’après la figure 1-34, nous avons :

$$\varphi_{\text{trajet}}(P) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\|\vec{R}_a\| + \|\vec{R}_b\| \right) \quad (1.68)$$

$$\varphi_n = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\|\vec{R}_a + \vec{r}_n\| + \|\vec{R}_M\| \right) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\|\vec{R}_a + \vec{r}_n\| + \|\vec{R}_b - \vec{r}_n\| \right) \quad (1.69)$$

La phase de construction s’exprime donc de la façon suivante :

$$\varphi_{\text{construction}} = \text{Arg} \left(\sum_{n=1}^N a_n \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \left(\|\vec{R}_a + \vec{r}_n\| + \|\vec{R}_b - \vec{r}_n\| - \|\vec{R}_a\| - \|\vec{R}_b\| \right) \right) \right) \quad (1.70)$$

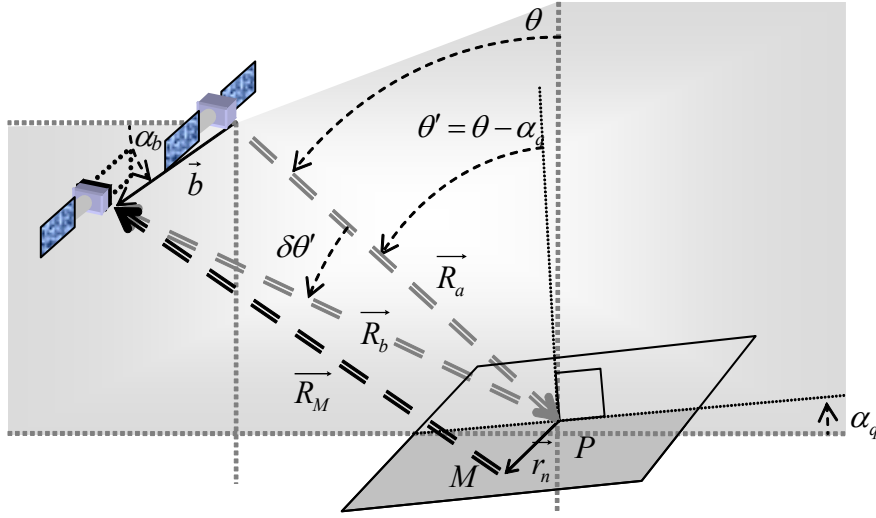


FIGURE 1-34. Différence de distance entre un émetteur et une cible M au sein d'un pixel P , et entre cette même cible et un récepteur, pour une acquisition : $\vec{R}_a = \vec{R}_b$ dans le cas monostatique et $\vec{R}_a \neq \vec{R}_b$ dans le cas bistatique.

Nous définissons δr_n :

$$\delta r_n = \|\vec{R}_a + \vec{r}_n\| + \|\vec{R}_b - \vec{r}_n\| - \|\vec{R}_a\| - \|\vec{R}_b\| \quad (1.71)$$

Or nous pouvons utiliser l'approximation des distances développée en annexe (cf. paragraphe 5.3.1) :

$$\|\vec{R} \pm \vec{r}\| = R \pm \frac{\vec{R} \cdot \vec{r}}{R} + \frac{r^2}{2R} \left(1 - \left(\frac{\vec{R} \cdot \vec{r}}{Rr} \right)^2 \right) + R O^3 \left(\frac{r}{R} \right) \quad (1.72)$$

L'approximation à l'ordre 2 génère une erreur sur la phase de l'ordre de :

$$\xi[\varphi_{\text{construction}}] = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{r^3}{R^2} \quad (1.73)$$

Pour tous les systèmes radar interférométriques, cela donne une erreur inférieure à 0,003% de 2π . En utilisant l'approximation (1.72), l'expression (1.71) se réécrit :

$$\delta r_n \approx R_a + \frac{\vec{R}_a \cdot \vec{r}_n}{R_a} + \frac{r_n^2}{2R_a} \left(1 - \left(\frac{\vec{R}_a \cdot \vec{r}_n}{R_a r_n} \right)^2 \right) + R_b - \frac{\vec{R}_b \cdot \vec{r}_n}{R_b} + \frac{r_n^2}{2R_b} \left(1 - \left(\frac{\vec{R}_b \cdot \vec{r}_n}{R_b r_n} \right)^2 \right) - R_a - R_b \quad (1.74)$$

$$\delta r_n \approx \frac{1}{R_a} \left(\vec{R}_a \cdot \vec{r}_n + \frac{r_n^2}{2} \left(1 - \left(\frac{\vec{R}_a \cdot \vec{r}_n}{R_a r_n} \right)^2 \right) \right) + \frac{1}{R_b} \left(-\vec{R}_b \cdot \vec{r}_n + \frac{r_n^2}{2} \left(1 - \left(\frac{\vec{R}_b \cdot \vec{r}_n}{R_b r_n} \right)^2 \right) \right) \quad (1.75)$$

Nous avons donc, pour chacune des images i :

$$\varphi_{\text{construction}}(C_i) = \text{Arg} \left(\sum_{n=1}^N a_n \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \delta r_n(C_i) \right) \right) \quad (1.76)$$

Pour des conditions géométriques d'acquisition différentes C_1 et C_2 , il n'y a *a priori* aucune chance pour que les phases de construction soient identiques, sauf pour des dispositions de réflecteurs particulières (par exemple, en une seule ligne selon l'azimut). La seule façon de permettre au postulat 4 d'être valide est de supposer que la seconde image a été produite avec un éclairage de longueur d'onde λ' différente et pour des conditions géométriques qui ne diffèrent que faiblement par l'angle d'observation dans la direction de la distance (pas de dépointage ou de décalage en azimut). Nous pouvons alors écrire, pour chaque réflecteur, une égalité terme à terme entre les phases de trajet interne :

$$\forall n \in [1 \dots N], \frac{\delta r_n(C_1)}{\lambda} = \frac{\delta r_n(C_2)}{\lambda'} \quad (1.77)$$

Cas monostatique

Considérons le cas monostatique : $\vec{R}_a(C_1) = -\vec{R}_b(C_1) = \vec{R}$ et $\vec{R}_a(C_2) = -\vec{R}_b(C_2) = \vec{R} - \vec{b}$. Nous pouvons simplifier l'expression (1.75) de δr_n :

$$\delta r_n(C_1) \approx \frac{1}{R} \left(\vec{R} \cdot \vec{r}_n + \frac{r_n^2}{2} \left(1 - \left(\frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R r_n} \right)^2 \right) \right) + \frac{1}{R} \left(\vec{R} \cdot \vec{r}_n + \frac{r_n^2}{2} \left(1 - \left(\frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R r_n} \right)^2 \right) \right) \quad (1.78)$$

$$\begin{aligned} \delta r_n(C_2) \approx & \frac{1}{\|\vec{R} - \vec{b}\|} \left((\vec{R} - \vec{b}) \cdot \vec{r}_n + \frac{r_n^2}{2} \left(1 - \left(\frac{(\vec{R} - \vec{b}) \cdot \vec{r}_n}{\|\vec{R} - \vec{b}\| r_n} \right)^2 \right) \right) \\ & + \frac{1}{\|\vec{R} - \vec{b}\|} \left((\vec{R} - \vec{b}) \cdot \vec{r}_n + \frac{r_n^2}{2} \left(1 - \left(\frac{(\vec{R} - \vec{b}) \cdot \vec{r}_n}{\|\vec{R} - \vec{b}\| r_n} \right)^2 \right) \right) \end{aligned} \quad (1.79)$$

$$\delta r_n(C_1) \approx 2 \frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R} + \frac{r_n^2}{R} \left(1 - \left(\frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R r_n} \right)^2 \right) \quad (1.80)$$

$$\delta r_n(C_2) \approx 2 \frac{(\vec{R} - \vec{b}) \cdot \vec{r}_n}{\|\vec{R} - \vec{b}\|} + \frac{r_n^2}{\|\vec{R} - \vec{b}\|} \left(1 - \left(\frac{(\vec{R} - \vec{b}) \cdot \vec{r}_n}{\|\vec{R} - \vec{b}\| r_n} \right)^2 \right) \quad (1.81)$$

Nous posons :

$$\vec{R} \cdot \vec{r}_n = R r_n \cos(\vec{R}, \vec{r}_n) = R r_n \cos(\chi_n) \quad (1.82)$$

$$\vec{b} \cdot \vec{r}_n = b r_n \cos(\vec{b}, \vec{r}_n) = b r_n \cos(\psi_n) \quad (1.83)$$

Nous obtenons :

$$\delta r_n(C_1) \approx 2 r_n \cos(\chi_n) + \frac{r_n^2}{R} \sin^2(\chi_n) \quad (1.84)$$

et, en notant $\varepsilon = \frac{b}{R}$:

$$\delta r_n(C_2) \approx 2 R r_n \frac{\cos(\chi_n) - \varepsilon \cos(\psi_n)}{\|\vec{R} - \vec{b}\|} + \frac{r_n^2}{\|\vec{R} - \vec{b}\|} \left(1 - \left(R \frac{\cos(\chi_n) - \varepsilon \cos(\psi_n)}{\|\vec{R} - \vec{b}\|} \right)^2 \right) \quad (1.85)$$

Nous employons l'approximation géométrique suivante (cf. paragraphe 5.3.1), qui a déjà été appliquée, sous une forme légèrement différente, en (1.72) :

$$\|\vec{R} - \vec{b}\| \approx R \left(1 + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b) + \frac{\varepsilon^2}{2} \cos^2(\theta - \alpha_b) \right) \quad (1.86)$$

D'où la relation entre les longueurs d'onde, d'après l'hypothèse (1.77), au premier ordre en ε et à l'ordre zéro en $\frac{r_n}{R}$ (la différence d'ordre se justifie par $r_n \ll b$) :

$$\frac{\cos(\chi_n)}{\lambda} \approx \frac{\cos(\chi_n) - \varepsilon \cos(\psi_n)}{\lambda' (1 + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b))} \quad (1.87)$$

Pour presque tous les réflecteurs du pixel, $|\cos(\chi_n)| > \varepsilon$, ce qui implique en particulier que $\cos(\chi_n) - \varepsilon \cos(\psi_n) \neq 0$. Nous déduisons de (1.87) la relation suivante entre les fréquences :

$$f'_0 \approx f_0 \frac{\cos(\chi_n)}{\cos(\chi_n) - \varepsilon \cos(\psi_n)} (1 + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b)) \quad (1.88)$$

$$f'_0 \approx f_0 \frac{1 + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b)}{1 - \varepsilon \frac{\cos(\psi_n)}{\cos(\chi_n)}} \quad (1.89)$$

$$f'_0 \approx f_0 (1 + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b)) \left(1 + \varepsilon \frac{\cos(\psi_n)}{\cos(\chi_n)} \right) \quad (1.90)$$

$$f'_0 \approx f_0 \left(1 + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b) + \varepsilon \frac{\cos(\psi_n)}{\cos(\chi_n)} \right) \quad (1.91)$$

Soit un décalage en fréquence Δf tel que :

$$\Delta f = f'_0 - f_0 \approx \varepsilon f_0 \left(\sin(\theta - \alpha_b) + \frac{\cos(\psi_n)}{\cos(\chi_n)} \right) \quad (1.92)$$

Cas bistatique

Considérons maintenant le cas bistatique : $\vec{R}_a(C_1) = -\vec{R}_b(C_1) = \vec{R}$, $\vec{R}_a(C_2) = \vec{R}$ et $\vec{R}_b(C_2) = -\vec{R} + \vec{b}$. Nous pouvons simplifier l'expression de δr_n :

$$\delta r_n(C_1) \approx \frac{1}{R} \left(\vec{R} \cdot \vec{r}_n + \frac{r_n^2}{2} \left(1 - \left(\frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R r_n} \right)^2 \right) \right) + \frac{1}{R} \left(\vec{R} \cdot \vec{r}_n + \frac{r_n^2}{2} \left(1 - \left(\frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R r_n} \right)^2 \right) \right) \quad (1.93)$$

$$\begin{aligned} \delta r_n(C_2) \approx & \frac{1}{R} \left(\vec{R} \cdot \vec{r}_n + \frac{r_n^2}{2} \left(1 - \left(\frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R r_n} \right)^2 \right) \right) \\ & + \frac{1}{\|\vec{R} - \vec{b}\|} \left((\vec{R} - \vec{b}) \cdot \vec{r}_n + \frac{r_n^2}{2} \left(1 - \left(\frac{(\vec{R} - \vec{b}) \cdot \vec{r}_n}{\|\vec{R} - \vec{b}\| r_n} \right)^2 \right) \right) \end{aligned} \quad (1.94)$$

$$\delta r_n(C_1) \approx 2 \frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R} + \frac{r_n^2}{R} \left(1 - \left(\frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R r_n} \right)^2 \right) \quad (1.95)$$

$$\delta r_n(C_2) \approx \frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R} + \frac{r_n^2}{2R} \left(1 - \left(\frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R r_n} \right)^2 \right) + \frac{(\vec{R} - \vec{b}) \cdot \vec{r}_n}{\|\vec{R} - \vec{b}\|} + \frac{r_n^2}{2\|\vec{R} - \vec{b}\|} \left(1 - \left(\frac{(\vec{R} - \vec{b}) \cdot \vec{r}_n}{\|\vec{R} - \vec{b}\| r_n} \right)^2 \right) \quad (1.96)$$

En introduisant les angles χ_n et ψ_n et le facteur ε , nous obtenons :

$$\delta r_n(C_1) \approx 2 r_n \cos(\chi_n) + \frac{r_n^2}{R} \sin^2(\chi_n) \quad (1.97)$$

$$\begin{aligned} \delta r_n(C_2) \approx & r_n \cos(\chi_n) + \frac{r_n^2}{2R} \sin^2(\chi_n) \\ & + R r_n \frac{\cos(\chi_n) - \varepsilon \cos(\psi_n)}{\|\vec{R} - \vec{b}\|} + \frac{r_n^2}{2\|\vec{R} - \vec{b}\|} \left(1 - \left(R \frac{\cos(\chi_n) - \varepsilon \cos(\psi_n)}{\|\vec{R} - \vec{b}\|} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (1.98)$$

D'où la relation entre les longueurs d'onde, au premier ordre en ε et à l'ordre zéro en $\frac{r_n}{R}$:

$$\frac{2 \cos(\chi_n)}{\lambda} \approx \frac{1}{\lambda'} \left(\cos(\chi_n) + \frac{\cos(\chi_n) - \varepsilon \cos(\psi_n)}{1 + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b)} \right) \quad (1.99)$$

$$\frac{2 \cos(\chi_n)}{\lambda} \approx \frac{1}{\lambda'} \left(\frac{2 \cos(\chi_n) - \varepsilon \cos(\psi_n) + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b) \cos(\chi_n)}{1 + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b)} \right) \quad (1.100)$$

Nous en déduisons la relation entre les fréquences :

$$f'_0 \approx f_0 \frac{1 + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b)}{1 - \frac{\varepsilon \cos(\psi_n)}{2 \cos(\chi_n)} + \frac{\varepsilon}{2} \sin(\theta - \alpha_b)} \quad (1.101)$$

$$f'_0 \approx f_0 (1 + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b)) \left(1 + \frac{\varepsilon \cos(\psi_n)}{2 \cos(\chi_n)} - \frac{\varepsilon}{2} \sin(\theta - \alpha_b) \right) \quad (1.102)$$

$$f'_0 \approx f_0 \left(1 + \varepsilon \sin(\theta - \alpha_b) + \frac{\varepsilon \cos(\psi_n)}{2 \cos(\chi_n)} - \frac{\varepsilon}{2} \sin(\theta - \alpha_b) \right) \quad (1.103)$$

$$f'_0 \approx f_0 \left(1 + \frac{\varepsilon}{2} \sin(\theta - \alpha_b) + \frac{\varepsilon \cos(\psi_n)}{2 \cos(\chi_n)} \right) \quad (1.104)$$

Soit un décalage en fréquence Δf tel que :

$$\Delta f = f'_0 - f_0 \approx \frac{\varepsilon}{2} f_0 \left(\sin(\theta - \alpha_b) + \frac{\cos(\psi_n)}{\cos(\chi_n)} \right) \quad (1.105)$$

Cas général

Nous tirons des relations (1.92) et (1.105) la formulation générale pour les cas monostatique et bistatique :

$$\Delta f \approx \frac{\varepsilon}{k_{st}} f_0 \left(\sin(\theta - \alpha_b) + \frac{\cos(\psi_n)}{\cos(\chi_n)} \right) \quad (1.106)$$

Nous pouvons simplifier cette expression, en utilisant des relations angulaires déduites de la construction de la figure 1-35. Nous pouvons remarquer que cette figure n'illustre pas le cas général, dans la mesure où seul l'angle α_q est supposé non nul : dans cette démonstration, nous supposons que β_{pq} , qui est le deuxième angle permettant de caractériser l'orientation locale de la surface, est nul.

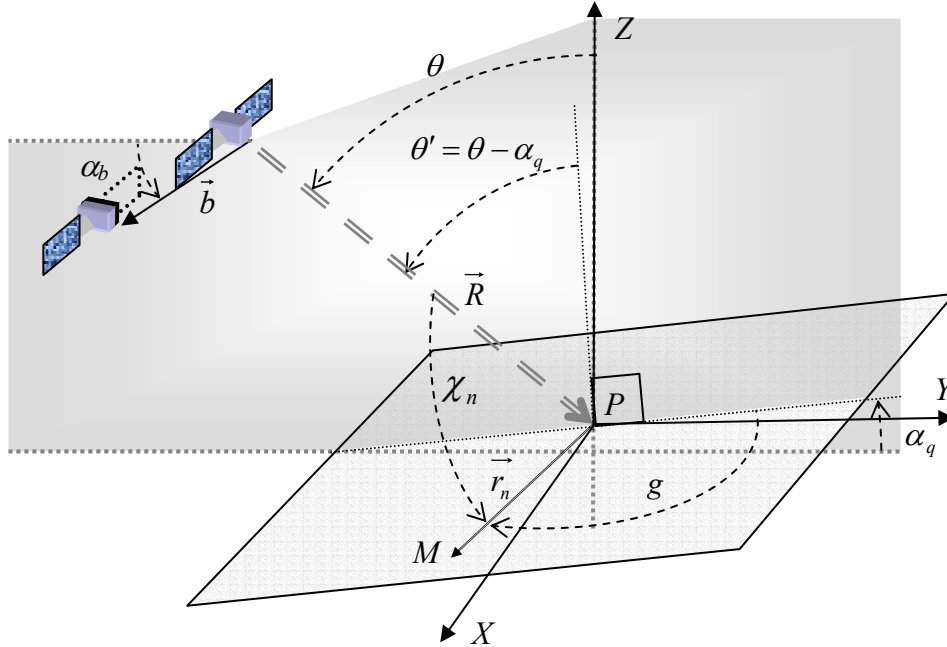


FIGURE 1-35. Relations entre les différents angles impliqués dans des conditions interférométriques en un point M appartenant à un pixel dont le centre est P.

Nous rappelons tout d'abord que :

$$\cos(\psi_n) = \frac{\vec{b} \cdot \vec{r}_n}{b r_n} \text{ et } \cos(\chi_n) = \frac{\vec{R} \cdot \vec{r}_n}{R r_n} \quad (1.107)$$

Nous considérons le repère \mathfrak{R} (PXYZ) et déterminons les coordonnées des différents vecteurs :

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} 0 \\ R \sin(\theta) \\ -R \cos(\theta) \end{pmatrix}_{\mathfrak{R}}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ -b \cos(\alpha_b) \\ -b \sin(\alpha_b) \end{pmatrix}_{\mathfrak{R}} \text{ et } \vec{r}_n = \begin{pmatrix} -r_n \sin(g) \\ r_n \cos(g) \cos(\alpha_q) \\ r_n \cos(g) \sin(\alpha_q) \end{pmatrix}_{\mathfrak{R}} \quad (1.108)$$

Les produits scalaires et les relations trigonométriques nous permettent d'obtenir les équations suivantes :

$$\cos(\chi_n) = \cos(g) \sin(\theta - \alpha_q) \quad (1.109)$$

$$\cos(\psi_n) = -\cos(g) \cos(\alpha_b - \alpha_q) \quad (1.110)$$

Nous pouvons donc simplifier l'expression (1.106) du décalage spectral et noter qu'elle ne dépend pas de la position de la cible dans le pixel :

$$\Delta f \approx \frac{\varepsilon}{k_{st}} f_0 \left(\sin(\theta - \alpha_b) - \frac{\cos(\alpha_b - \alpha_q)}{\sin(\theta - \alpha_q)} \right) \quad (1.111)$$

$$\Delta f \approx \frac{\varepsilon}{k_{st}} f_0 \left(\frac{\sin(\theta - \alpha_b) \sin(\theta - \alpha_q) - \cos(\alpha_b - \theta + \theta - \alpha_q)}{\sin(\theta - \alpha_q)} \right) \quad (1.112)$$

$$\Delta f \approx \frac{\varepsilon}{k_{st}} f_0 \left(\frac{-\cos(\theta - \alpha_q) \cos(\theta - \alpha_b)}{\sin(\theta - \alpha_q)} \right) \quad (1.113)$$

Nous obtenons finalement l'expression du décalage spectral :

$$\Delta f \approx -\frac{1}{k_{st}} f_0 \frac{b \cos(\theta - \alpha_b)}{R \tan(\theta - \alpha_q)} \quad (1.114)$$

Décalage spectral et bande passante

Nous notons que le décalage spectral dépend des angles locaux d'incidence de l'onde par rapport au sol $\theta' = \theta - \alpha_q$ et par rapport à un sol supposé plat θ . Sa valeur varie donc dans la scène. Nous supposons que la dispersion des décalages fréquentiels est faible par rapport à leur moyenne. Cela signifie que, pour que le postulat 4 soit respecté, il est indispensable d'éclairer la scène avec une fréquence différente, en rapport avec le décalage spectral moyen. Dans chaque image, nous obtenons la même réponse du sol pour des fréquences différentes.

Heureusement, le signal radar reçu a une bande passante B . Nous avons donc une partie commune de spectre entre les deux signaux radar (cf. figure 1-36). Les parties communes de spectre contribuent à produire un signal interférométrique en accord avec le postulat 4. En revanche, les parties de spectre non communes produisent un signal parasite assimilable, du point de vue interférométrique, à un bruit appelé « décorrélation angulaire ». En supprimant ces parties, le bruit de l'interférogramme serait réduit.

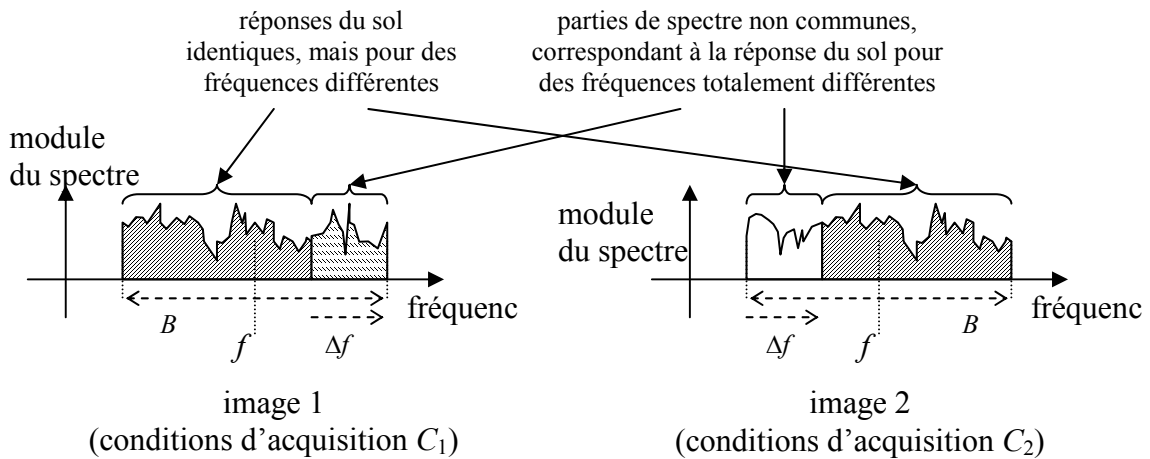


FIGURE 1-36. Décalage de la réponse spectrale du sol selon les conditions d'acquisition.

Cependant, le décalage spectral étant variable dans l'image, le calcul interférométrique doit prendre en compte la pente locale du sol pour être pertinent (ce principe est appliqué dans le logiciel DIAPASON du CNES [Massonnet 1997]). Dans le cas de l'interférométrie stéréoscopique, la tâche est plus ardue, puisque le but est justement d'estimer la pente à partir de l'interférogramme. La connaissance d'un modèle numérique de terrain grossier réduit malgré tout l'erreur.

Ligne de base maximale

Lorsque les deux spectres sont disjoints, le calcul interférométrique devient dénué de sens. La limite interférométrique est donc dépassée lorsque :

$$|\Delta f| \approx \frac{1}{k_{st}} f_0 \frac{b}{R} \frac{\cos(\theta - \alpha_b)}{\tan(\theta - \alpha_q)} = B \quad (1.115)$$

Pour les systèmes spatiaux, la limite interférométrique est souvent liée à une ligne de base maximale :

$$b_{\max} = k_{st} R \frac{B}{f_0} \frac{\tan(\theta - \alpha_q)}{\cos(\theta - \alpha_b)} \quad (1.116)$$

1.2.3.3. Écart au postulat 1

Paradoxe interférométrique

La technique interférométrique vise à mesurer la différence de distance $R_2 - R_1$. Or, le postulat 1 suppose que les images sont superposables, c'est-à-dire que deux pixels des images 1 et 2, de mêmes coordonnées $(u_1, v_1) = (u_2, v_2)$, correspondent au même point physique. Or, s'il y a une différence de distance, cela veut dire que les coordonnées des pixels en distance sont différentes entre les deux images, ce qui constitue un paradoxe. Il est donc certain que le postulat 1 ne peut être rigoureusement vérifié, c'est-à-dire qu'il existe une disparité non nulle entre pixels correspondant à un même point physique. Une étape préalable de recalage peut donc s'avérer nécessaire, si cette disparité est plus importante que la résolution du système.

Dans le cas de l'interférométrie différentielle, le recalage n'est pas forcément requis, car les conditions d'observation sont quasi-identiques et les déplacements considérés sont faibles devant la résolution (dans le cas du tremblement de terre d'Izmit, les déplacements sont décimétriques et les résolutions employées décamétriques, avec ERS).

En revanche, dans le cas de l'interférométrie stéréoscopique, la nécessité d'un recalage est fort probable *a priori* (la démonstration en est donnée ci-après), puisque la géométrie d'observation est différente pour les deux images. Pour une ligne de base b faible, c'est-à-dire inférieure à la valeur b_{\max} donnée par (1.116), l'équation (1.62) permet d'exprimer la différence de distance $R_2 - R_1$, dans le cadre d'une approximation au premier ordre en b/R_1 :

$$R_2 - R_1 \approx \frac{1}{k_{st}} b \sin(\theta - \alpha_b) \quad (1.117)$$

L'erreur de superposition $R_2 - R_1$ entre les deux images peut donc s'exprimer relativement à la ligne de base b :

$$\frac{R_2 - R_1}{b} \approx \frac{1}{k_{st}} \sin(\theta - \alpha_b) \quad (1.118)$$

Ce rapport dépend de l'angle d'incidence θ (pour un sol supposé plat, cf. figure 1-37), ainsi que l'illustre la courbe de la figure 1-38. Le domaine de variation de l'angle d'incidence dans

une image radar est communément comprise entre 25 degrés et 55 degrés. Si les images sont recalées au centre par une simple translation, il subsiste une erreur de recalage, sur les bords de l'image, de l'ordre de 20% de la ligne de base, pour un système monostatique ($k_{st} = 1$) et pour un angle α_b nul. Cette erreur est généralement une dizaine de fois supérieure à la résolution en distance.

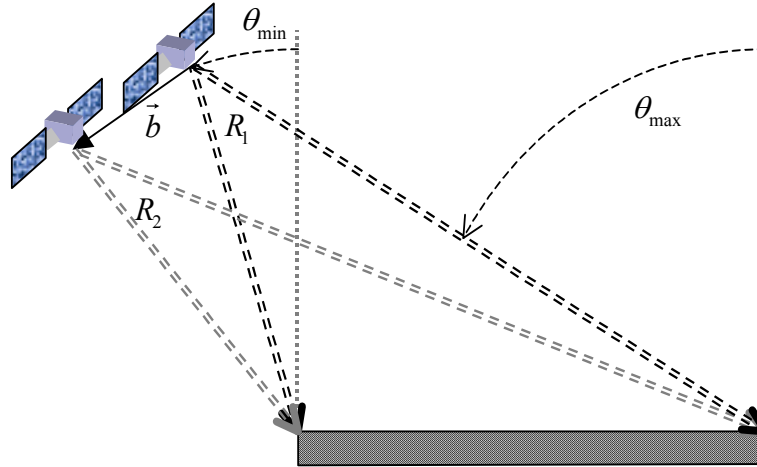


FIGURE 1-37. Variations de la différence de distance $R_2 - R_1$ en fonction de l'angle d'incidence θ .

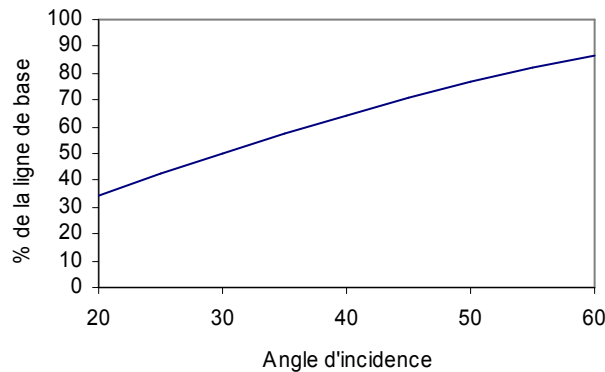


FIGURE 1-38. Courbe de variation de la différence de distance $R_2 - R_1$, en pourcentage de la ligne de base b , en fonction de l'angle d'incidence θ (cas où $\alpha_b = 0$).

Une étape de recalage est donc nécessaire pour calculer la transformation géométrique corrective qui permettra de rendre les images superposables et d'être conforme au postulat 1. Deux stratégies sont possibles : soit nous transformons géométriquement une des deux images pour la mettre dans la géométrie de l'autre, soit nous les transformons toutes les deux dans une géométrie commune, par exemple celle du référentiel géographique.

Recalage grossier

Un recalage grossier peut être réalisé de deux manières différentes :

- Nous pouvons supposer le sol plat ou employer un modèle numérique de terrain grossier. La connaissance des conditions géométriques d'acquisition des deux images permet de trouver une transformation grossière entre les deux images. Compte tenu du faible angle

d'observation stéréoscopique, ce recalage grossier est généralement très efficace et suffisant, comme nous le verrons plus loin.

- Nous pouvons également corrélérer globalement les deux images, afin de trouver la rotation et l'homothétie (dans la direction des distances) susceptibles de rendre les images superposables (ce qui est grossièrement équivalent à corriger l'effet d'une pente uniforme sur l'image).

Erreur de recalage produite par le relief

Nous nous intéressons maintenant à l'erreur de recalage résiduelle, après qu'un recalage grossier a été fait. Nous souhaitons estimer la variation de décalage entre les deux images due à une variation δh d'altitude. Nous considérons un déplacement δd , à une distance R . L'écart angulaire $\delta\theta$ produit par cette variation d'altitude et ce déplacement se déduit de la géométrie de la scène (cf. figure 1-37) :

$$\tan(\theta - \alpha_q) = \frac{\delta d}{R \delta\theta} \quad (1.119)$$

$$\delta\theta = \frac{\delta d}{R \tan(\theta - \alpha_q)} \quad (1.120)$$

En différenciant (1.117), la variation de décalage induite est :

$$\delta(R_2 - R_1) \approx \frac{1}{k_{st}} b \cos(\theta - \alpha_b) \delta\theta \quad (1.121)$$

Grâce à (1.120) :

$$\frac{\delta(R_2 - R_1)}{\delta d} \approx \frac{1}{k_{st}} \frac{b \cos(\theta - \alpha_b)}{R \tan(\theta - \alpha_q)} \quad (1.122)$$

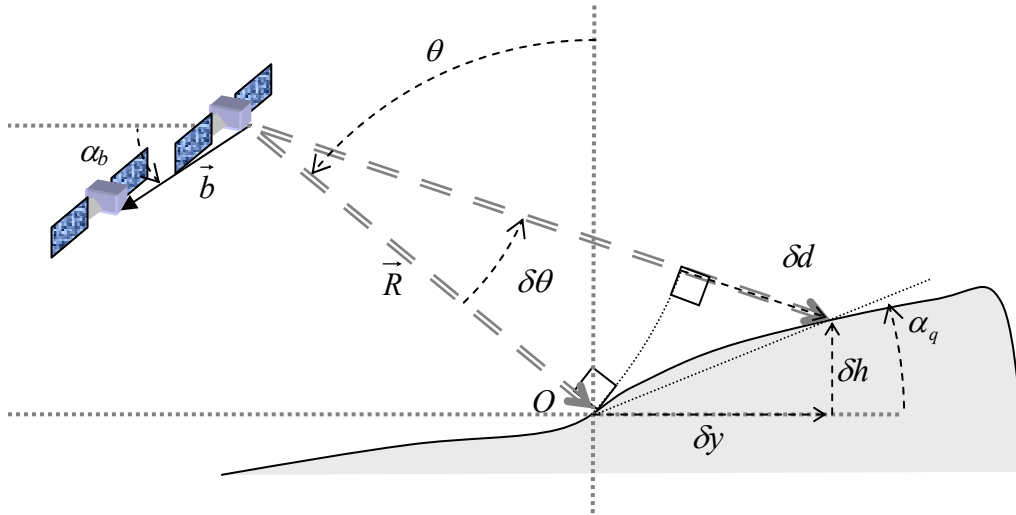


FIGURE 1-37. Relations géométriques relatives à un petit déplacement sur le relief.

Sur un sol plat, cette relation devient :

$$\frac{\delta(R_2 - R_1)}{\delta d} \approx \frac{1}{k_{st}} \frac{b \cos(\theta - \alpha_b)}{R \tan(\theta)} \quad (1.123)$$

Nous supposons que cette dernière erreur de recalage, qui correspond à un sol supposé plat, a été corrigée. L'erreur de recalage résiduelle entre les deux images, due à l'angle α_q , vaut donc :

$$\varepsilon_{\text{recalage}} = \frac{\delta(R_2 - R_1)}{\delta d} - \frac{\overline{\delta(R_2 - R_1)}}{\delta d} \approx \frac{1}{k_{\text{st}}} \frac{b}{R} \left(\frac{\cos(\theta - \alpha_b)}{\tan(\theta - \alpha_q)} - \frac{\cos(\theta - \alpha_b)}{\tan(\theta)} \right) \quad (1.124)$$

$$\varepsilon_{\text{recalage}} \approx \frac{1}{k_{\text{st}}} \frac{b}{R} \cos(\theta - \alpha_b) \left(\frac{\cos(\theta - \alpha_q)}{\sin(\theta - \alpha_q)} - \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)} \right) \quad (1.125)$$

$$\varepsilon_{\text{recalage}} \approx \frac{1}{k_{\text{st}}} \frac{b}{R} \cos(\theta - \alpha_b) \frac{\sin(\theta) \cos(\theta - \alpha_q) - \cos(\theta) \sin(\theta - \alpha_q)}{\sin(\theta) \sin(\theta - \alpha_q)} \quad (1.126)$$

$$\varepsilon_{\text{recalage}} \approx \frac{1}{k_{\text{st}}} \frac{b}{R} \cos(\theta - \alpha_b) \frac{\sin(\alpha_q)}{\sin(\theta) \sin(\theta - \alpha_q)} \quad (1.127)$$

Sachant que $\frac{b}{R} \ll 1$, nous voyons que cette erreur est faible lorsque la pente locale n'est pas trop importante. Cependant, ces erreurs se cumulent ou se compensent le long de l'image. Nous pouvons en conclure que le postulat 1 est plutôt bien respecté si le relief n'est pas trop marqué ou si un modèle numérique de terrain permet de corriger les décalages les plus importants produits par le relief.

Dans le cadre de cette thèse, les données disponibles ont été préalablement géocodées, ce qui signifie que les défauts majeurs de recalage ont été supprimés. En outre, mon intérêt s'est essentiellement porté sur des zones urbaines ou semi-urbaines, où le relief du terrain est faible.

Remarques sur le recalage dense

Nous pouvons noter que, normalement, la mesure de la distance R_i est connue, puisqu'elle se déduit de la coordonnée en distance v_i , pour un pixel donné (DP_i est la distance proximale de l'image i) :

$$R_i = DP_i + \delta_d v_i \quad (1.128)$$

Cependant, pour mesurer la différence de distance $R_2 - R_1$, il est nécessaire de déterminer une bijection entre les pixels des deux images. Dans le cas d'une mise en correspondance locale, l'erreur de localisation est de l'ordre de la résolution Δ_d ²¹ (ou d'une fraction de la résolution, selon le nombre de pixels employés pour son estimation). La mise en correspondance locale ne permet donc pas d'estimer la différence de distance $R_2 - R_1$ avec une précision bien meilleure que la résolution (qui est supérieure au pas de pixel δ_d).

En revanche, la différence de distance mesurée dans des conditions interférométriques vaut, d'après (1.38) :

$$R_2 - R_1 = \frac{\lambda}{4\pi} [\varphi_2 - \varphi_1 - Cste_{\text{météo}}] + \frac{\lambda}{4\pi} O(\xi_{\text{météo}} + \xi_{\text{rétrodiffusion}} + \xi_{\text{construction}}) \quad (1.129)$$

Avec une précision de $\pi/4$ sur les phases, nous obtenons une précision d'un huitième de la longueur d'onde sur la différence de distance $R_2 - R_1$. Compte tenu des longueurs d'onde employées, la précision est généralement centimétrique, voire millimétrique, c'est-à-dire bien meilleure que celle obtenue par une simple mesure de décalage (ou disparité) sur l'image (la résolution est au mieux de quelques décimètres sur les systèmes aéroportés).

²¹ Elle ne peut pas être plus faible, à moins de dégrader la densité de l'information.

Cependant, cette précision interférométrique est inversement proportionnelle à la ligne de base b . Lorsque la ligne de base croît, le postulat 4 risque de ne plus être vérifié. En revanche, il devient possible de mesurer avec une bonne précision la différence $R_2 - R_1$, par mesure de la disparité. C'est le principe de la radargrammétrie.

1.2.3.4. Écarts aux postulats 2 et 3

Les postulats 2 et 3 constituent une importante contrainte pour les systèmes monostatiques (la totalité des systèmes satellitaires actuels). Mes travaux de thèse se fondent essentiellement sur des images aéroportées acquises simultanément. Nous pouvons donc considérer que les postulats 2 et 3 sont vérifiés.

1.3 Techniques de reconstruction du relief par interférométrie ROS

1.3.1. Déroulement des franges

Les techniques classiques de reconstruction du relief passent par une étape intermédiaire de déroulement de franges. La littérature offre un large éventail de techniques [Maître 2001, Bamler 1998] qui constituent un sujet loin d'être épuisé [Lacombe 2004]. L'objectif est de résoudre l'ambiguïté induite par le terme $m2\pi$ sur la mesure de la phase interférométrique $\varphi_{2 \rightarrow 1}$:

$$\varphi_{2 \rightarrow 1} \approx \text{Arg} \left(\frac{E[z_2 z_1^*]}{\sqrt{E[z_1 z_1^*] E[z_2 z_2^*]}} \right) + m2\pi + Cste_{\text{atmosphérique}} \quad (1.130)$$

Les principaux écueils rencontrés par ces techniques sont :

- **Le bruit interférométrique.** Le bruit interférométrique se réduit par des méthodes de filtrage en pré-traitement [Massonnet 1997], mais aussi en post-traitement (par exemple par moyennage). La prise en compte du bruit peut également être effectuée directement dans la reconstruction (méthodes fondées sur la cohérence [Gamba 1999]).
- **Les zones de forte densité de franges.** Les fortes densités de franges peuvent induire l'oubli de l'une d'entre elles et fausser la reconstruction. Les hypothèses de continuité de la surface permettent de réduire les ambiguïtés, en déroulant les franges là où elles sont moins denses.
- **Les zones d'ombre.** En cas d'absence de signal (zones d'ombre), non seulement aucune mesure d'altitude ne peut être réalisée pour la zone géographique concernée, mais en plus une erreur globale de mesure d'altitude peut être introduite par rupture de la continuité (des franges manquent pour un déroulement correct).
- **Les résidus.** Enfin, les méthodes locales de déroulement peuvent donner des résultats différents, selon le chemin emprunté pour le déroulement. La recherche des résidus permet de cerner les points problématiques.

L'utilisation de systèmes multi-fréquences ou à ligne de base multiple permet de réduire les ambiguïtés, en disposant de fréquences de franges plus basses [Ferretti 96] et/ou non multiples les unes des autres [Xu 94, Massonnet 1996]. Si la réponse du sol est connue pour différentes lignes de base (donc pour des angles d'incidence différents), les variations de fréquence dues au décalage fréquentiel de cette même réponse permettent d'envisager une interférométrie directement « 3D ». En effet, la variation fréquentielle est analogue à la

modulation Doppler observée en azimuth et une synthèse angulaire du signal est possible [She 1999].

La figure 1-39-a fournit un exemple de franges interférométriques. Le déroulement de la phase a conduit à la reconstruction du relief (*cf.* figure 1-39). Nous pouvons remarquer un lien presque direct entre les franges interférométriques et le relief, comme si les franges indiquaient des courbes de niveau. Cet effet a été intentionnellement produit grâce à un traitement approprié de l'interférogramme (*cf.* paragraphe 1.3.2). Cependant, il faut garder à l'esprit que la géométrie radar projette les reliefs au sol et que l'interférogramme découpe angulairement l'image. Ainsi, la reconstruction du relief implique des translations horizontales du relief entre l'interférogramme et la projection au sol.

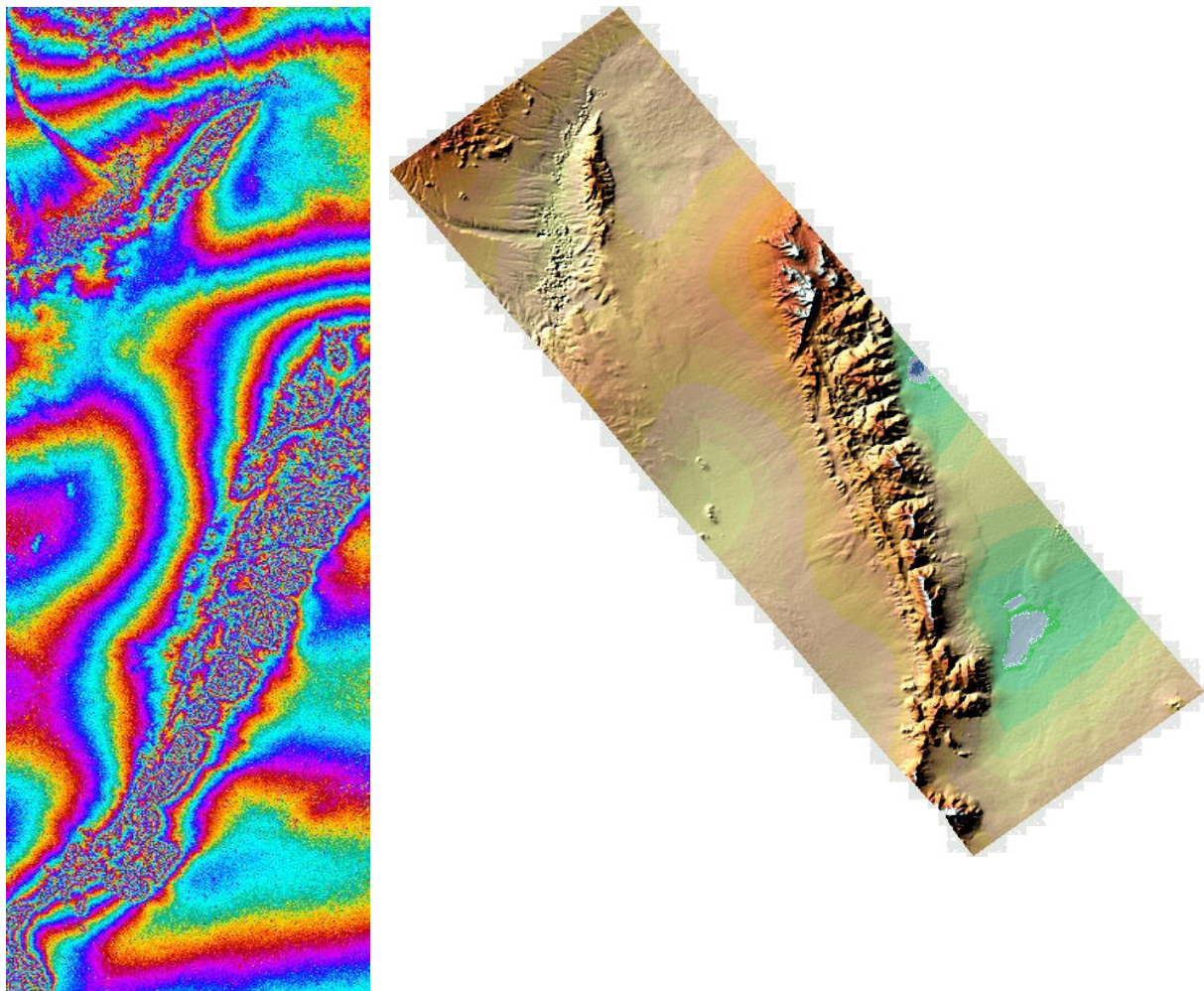


FIGURE 1-39. *Déroulement des franges interférométriques et reconstruction du relief : sud d'Albuquerque en Arizona (mission SRTM, NASA, JPL et DLR).*

1.3.2. Estimation du relief

1.3.2.1. Hauteurs absolues

La démonstration du paragraphe 1.2.2.3 a abouti à une formulation de l'altitude (1.65) en fonction de l'angle d'incidence, qui lui-même se déduit de la phase interférométrique par la relation (1.63). Le déroulement de la phase a permis de lever, en partie, l'ambiguïté introduite

par le modulo. Si nous utilisons (1.63) sous sa forme simplifiée au premier ordre en b/R_{b1} , c'est-à-dire (1.64), ainsi que (1.130), nous obtenons l'approximation suivante :

$$\theta \approx \text{Arcsin}\left(\frac{k_{st} \lambda \varphi_{2 \rightarrow 1}}{4\pi b}\right) + \alpha_b \quad (1.131)$$

Donc, d'après (1.65) :

$$h \approx H - R_{b1} \cos\left(\text{Arcsin}\left(\frac{k_{st} \lambda \varphi_{2 \rightarrow 1}}{4\pi b}\right) + \alpha_b\right) \quad (1.132)$$

Une formulation similaire peut être retrouvée dans la démonstration de Trouvé [Trouvé 1996] dans le cas où $\alpha_b = 0$. L'expression (1.132) est rarement utilisée car elle nécessite de connaître $\varphi_{2 \rightarrow 1}$ parfaitement. Notamment, l'ambiguïté sur le terme $m2\pi$ doit avoir été complètement levée, c'est-à-dire que non seulement la phase doit être complètement déroulée, mais en outre il faut connaître le nombre de tours de phase manquants entre le capteur et le début de l'acquisition. Une expression en fonction des coordonnées cartésiennes lui est souvent préférée. Elle peut être aisément obtenue en raisonnant sur les hauteurs relatives.

1.3.2.2. Hauteurs relatives

Il est parfois intéressant de travailler uniquement avec des variations relatives d'altitude entre des pixels consécutifs de l'image, et de recalculer ultérieurement le relief reconstruit.

Nous posons :

$$K = \frac{k_{st} \lambda}{4\pi b} \quad (1.133)$$

Considérons un petit déplacement δd selon l'axe des distances. Le relief engendre une variation d'altitude δh et une variation d'angle $\delta\theta$ illustrées par la figure 1-40, tels que :

$$H - (h + \delta h) = (R_{b1} + \delta d) \cos(\theta + \delta\theta) \quad (1.134)$$

$$h + \delta h = H - (R_{b1} + \delta d) (\cos(\theta) \cos(\delta\theta) - \sin(\theta) \sin(\delta\theta)) \quad (1.135)$$

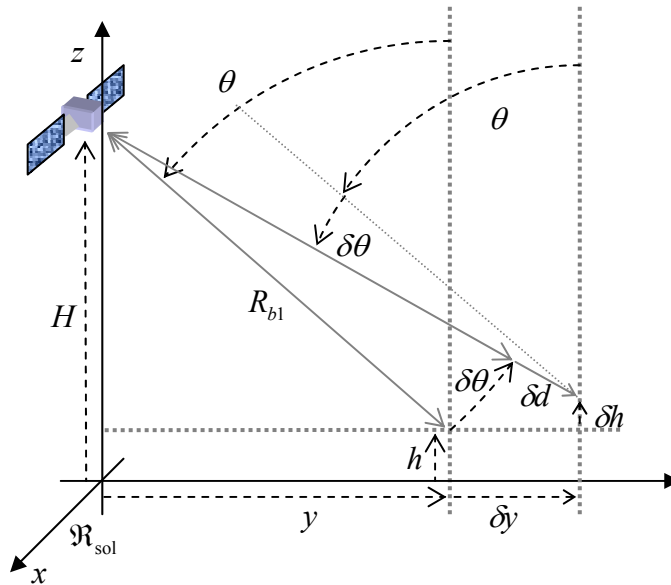


FIGURE 1-40. Variations d'altitude et d'angle pour un petit déplacement en distance.

Par différence avec l'expression de l'altitude h à la position initiale, nous obtenons la variation d'altitude :

$$\delta h = R_{b1} \cos(\theta) - (R_{b1} + \delta d) (\cos(\theta) \cos(\delta\theta) - \sin(\theta) \sin(\delta\theta)) \quad (1.136)$$

Les techniques de déroulement de la phase nécessitent que la variation de phase $\delta\varphi_{2 \rightarrow 1}$ soit inférieure à π . Cela implique que la variation angulaire $\delta\theta$ est généralement faible et nous pouvons simplifier l'expression précédente (cette hypothèse signifie que l'élément de surface considéré n'est pas tourné vers le radar) :

$$\delta\theta \ll 1 \Rightarrow \delta h = R_{b1} \cos(\theta) - (R_{b1} + \delta d) \left(-\delta\theta \sin(\theta) + \left(1 - \frac{\delta\theta^2}{2} \right) \cos(\theta) + O^3(\delta\theta) \right) \quad (1.137)$$

$$\delta h = -\delta d \cos(\theta) + (R_{b1} + \delta d) \left(\delta\theta \sin(\theta) + \frac{\delta\theta^2}{2} \cos(\theta) + O^3(\delta\theta) \right) \quad (1.138)$$

$$\delta h = R_{b1} \left[-\frac{\delta d}{R_{b1}} \cos(\theta) + \delta\theta \left(1 + \frac{\delta d}{R_{b1}} \right) \left(\sin(\theta) + \frac{\delta\theta}{2} \cos(\theta) + O^2(\delta\theta) \right) \right] \quad (1.139)$$

Quant à la variation angulaire $\delta\theta$, grâce à l'approximation (1.131), nous pouvons l'exprimer en fonction de $\delta\varphi_{2 \rightarrow 1}$:

$$\theta + \delta\theta = \text{Arcsin}(K(\varphi_{2 \rightarrow 1} + \delta\varphi_{2 \rightarrow 1})) + \alpha_b \quad (1.140)$$

L'hypothèse énoncée précédemment concernant $\delta\varphi_{2 \rightarrow 1}$ nous permet d'utiliser un développement limité de la fonction Arcsin, qui se déduit du développement de Taylor en un point x_0 :

$$f(x_0 + \varepsilon) = f(x_0) + \frac{\varepsilon}{1!} f'(x_0) + \frac{\varepsilon^2}{2!} f''(x_0) + O^3(\varepsilon) \quad (1.141)$$

avec :

$$x_0 = K\varphi_{2 \rightarrow 1} \quad (1.142)$$

$$\varepsilon = K\delta\varphi \quad (1.143)$$

$$f(x_0) = \text{Arcsin}(K\varphi_{2 \rightarrow 1}) \quad (1.144)$$

$$f'(x_0) = \frac{1}{\sin' \circ \text{Arcsin}(x_0)} = \frac{1}{\cos(\theta - \alpha_b)} \quad (1.145)$$

$$f''(x_0) = \frac{-(\cos \circ \text{Arcsin})'(x_0)}{(\cos \circ \text{Arcsin})^2(x_0)} = \frac{(\sin \circ \text{Arcsin})(x_0)}{(\cos \circ \text{Arcsin})^3(x_0)} = \frac{\sin(\theta - \alpha_b)}{\cos^3(\theta - \alpha_b)} \quad (1.146)$$

Finalement :

$$\begin{aligned} \text{Arcsin}(K(\varphi_{2 \rightarrow 1} + \delta\varphi_{2 \rightarrow 1})) &= \text{Arcsin}(K\varphi_{2 \rightarrow 1}) + K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1} \frac{1}{\cos(\theta - \alpha_b)} \\ &\quad + \frac{(K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1})^2}{2} \frac{\sin(\theta - \alpha_b)}{\cos^3(\theta - \alpha_b)} + O^3(K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1}) \end{aligned} \quad (1.147)$$

Ce développement nous permet de réécrire (1.140) :

$$\theta + \delta\theta = \text{Arcsin}(K\varphi_{2 \rightarrow 1}) + K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1} \frac{1}{\cos(\theta - \alpha_b)} + \frac{(K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1})^2}{2} \frac{\sin(\theta - \alpha_b)}{\cos^3(\theta - \alpha_b)} + O^3(K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1}) + \alpha_b \quad (1.148)$$

$$\delta\theta = K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1} \frac{1}{\cos(\theta - \alpha_b)} + \frac{(K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1})^2}{2} \frac{\sin(\theta - \alpha_b)}{\cos^3(\theta - \alpha_b)} + O^3(K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1}) \quad (1.149)$$

Au premier ordre en $K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1}$, nous obtenons :

$$\delta\theta \approx \frac{K}{\cos(\theta - \alpha_b)} \delta\varphi_{2 \rightarrow 1} = \frac{k_{st} \lambda}{4\pi b \cos(\theta - \alpha_b)} \delta\varphi_{2 \rightarrow 1} \quad (1.150)$$

En utilisant (1.139) et (1.150), au premier ordre en $K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1}$, $\delta\theta$ et $\delta d/R_{b1}$, l'expression de la variation d'altitude peut donc s'écrire :

$$\delta h \approx R_{b1} \left[-\frac{\delta d}{R_{b1}} \cos(\theta) + K\delta\varphi_{2 \rightarrow 1} \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta - \alpha_b)} \right] \quad (1.151)$$

$$\delta h \approx -\delta d \cos(\theta) + KR_{b1} \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta - \alpha_b)} \delta\varphi_{2 \rightarrow 1} \quad (1.152)$$

Inversement, il peut être intéressant d'exprimer les variations de phase de l'interférogramme en fonction des variations d'altitude :

$$\delta\varphi_{2 \rightarrow 1} \approx \frac{\cos(\theta - \alpha_b)}{KR_{b1} \sin(\theta)} [\delta h + \delta d \cos(\theta)] \quad (1.153)$$

$$\delta\varphi_{2 \rightarrow 1} \approx \frac{4\pi b \cos(\theta - \alpha_b)}{k_{st} \lambda R_{b1} \sin(\theta)} [\delta h + \delta d \cos(\theta)] \quad (1.154)$$

Nous devons noter que cette expression est fondée sur un développement limité au premier ordre autour de la position telle que :

$$\theta = \text{Arcsin}(K\varphi_{2 \rightarrow 1}) + \alpha_b \quad (1.155)$$

Or cet angle d'incidence varie dans l'image en fonction de la distance et de l'altitude. Cependant, cette approximation locale nous permet d'observer que la variation de phase est fonction de deux termes :

- Le premier terme en δh décrit les variations de phase produites par le relief. Celui-ci permet de construire le modèle numérique de terrain.

$$\delta\varphi_{2 \rightarrow 1} \approx \frac{4\pi b \cos(\theta - \alpha_b)}{k_{st} \lambda R_{b1} \sin(\theta)} \delta h + \dots \quad (1.156)$$

- Le second terme en δd décrit les variations de phase produites par un déplacement en distance sur terrain plat. Cette contribution produit des franges dites « orbitales ». En effet, elles ne dépendent que des paramètres des trajectoires des deux capteurs.

$$\delta\varphi_{2 \rightarrow 1} \approx \dots + \frac{4\pi b \cos(\theta - \alpha_b)}{k_{st} \lambda R_{b1} \tan(\theta)} \quad (1.157)$$

En général, les zones sélectionnées sont telles que $\delta h < \delta d$. En effet, les pentes ne sont vraiment importantes que sur les zones montagneuses (et en milieu urbain, où le mot « pente » n'est plus approprié). En outre, les postulats interférométriques 1 et 4 n'étant plus respectés

lorsque les pentes sont critiques, les conditions d'acquisition (incidence, ligne de base, zone observée) sont choisies en conséquence. En pratique, les franges orbitales sont donc dominantes sur un interférogramme (cf. figure 1-41-c).

Les franges orbitales peuvent être assez aisément estimées, notamment sur une zone de sol plat. Compte tenu du fait que ces franges orbitales sont fonction des paramètres de la trajectoire, nous pouvons accéder à leur estimation à partir des caractéristiques de ces franges. Nous pouvons notamment retrouver des grandeurs inconnues [Kagawa 2000] ou variables dans l'image, comme la ligne de base.

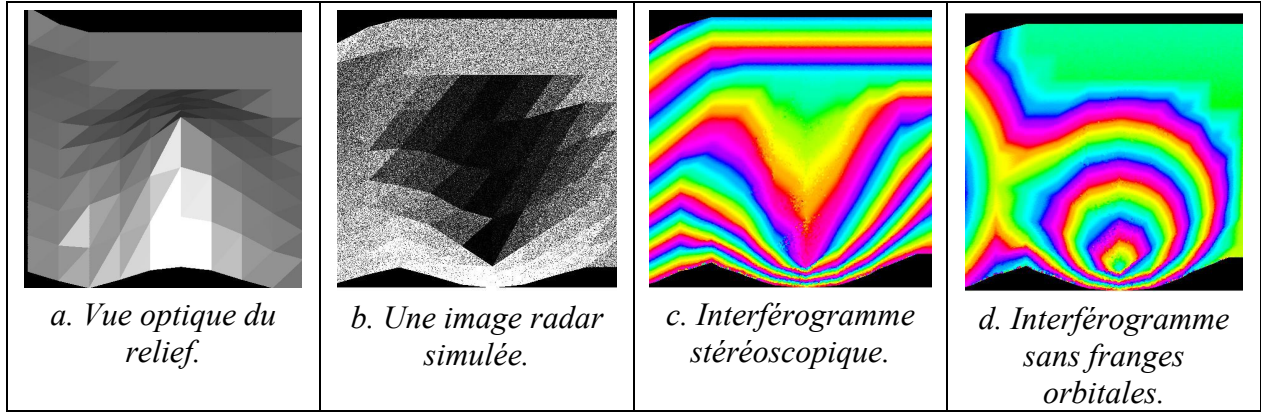


FIGURE 1-41. *Simulation de franges interférométriques sur un relief, produite par 2SIR (dans un cas idéal où il n'y a ni décalage entre les images interférométriques ni décorrélation angulaire). Le radar bistatique a une trajectoire de gauche à droite, en bas de l'image.*

Si nous soustrayons les franges orbitales, la variation de phase devient alors directement proportionnelle à la variation d'altitude (le coefficient de proportionnalité varie cependant dans l'image). Les franges qui subsistent découpent le relief en courbes iso-altitude (cf. figure 1-41-d).

1.3.2.3. Reconstruction du relief

Les mesures absolues ou relatives d'altitude ont été définies pour chaque pixel de l'interférogramme, dans une géométrie radar (projection en distance). Nous devons maintenant traduire le relief dans un repère géographique ou, à défaut, dans un repère cartésien comme celui qui est défini par la figure 1-40. Nous avons une relation simple entre la position horizontale y et la hauteur estimée h :

$$y = (H - h) \tan(\theta) \quad (1.158)$$

De nouveau, nous pouvons considérer des variations du premier ordre :

$$\delta y \approx -\delta h \tan(\theta) + (H - h) \frac{\delta \theta}{\cos^2(\theta)} \quad (1.159)$$

$$\delta y \approx -\delta h \tan(\theta) + \frac{y}{\tan(\theta)} \frac{\delta \theta}{\cos^2(\theta)} \quad (1.160)$$

$$\delta \theta \approx \frac{\cos(\theta) \sin(\theta)}{y} (\delta y + \delta h \tan(\theta)) \quad (1.161)$$

La figure 1-40 permet d'exprimer δy en fonction de δd et $\delta \theta$. Écrivons tout d'abord :

$$y = R_{b1} \sin \theta \quad (1.162)$$

$$y + \delta y = (R_{b1} + \delta d) \sin(\theta + \delta \theta) \quad (1.163)$$

En soustrayant ces deux relations membre à membre :

$$\delta y = (R_{b1} + \delta d) \sin(\theta + \delta \theta) - R_{b1} \sin(\theta) \quad (1.164)$$

$$\delta y = (R_{b1} + \delta d) [\sin(\theta) \cos(\delta \theta) + \cos(\theta) \sin(\delta \theta)] - R_{b1} \sin(\theta) \quad (1.165)$$

Au premier ordre en $\delta \theta$:

$$\delta y \approx (R_{b1} + \delta d) [\sin(\theta) + \delta \theta \cos(\theta)] - R_{b1} \sin(\theta) \quad (1.166)$$

$$\delta y \approx R_{b1} \sin(\theta) + \delta d \sin(\theta) + R_{b1} \delta \theta \cos(\theta) - R_{b1} \sin(\theta) \quad (1.167)$$

$$\delta y \approx \delta d \sin(\theta) + R_{b1} \delta \theta \cos(\theta) \quad (1.168)$$

Par ailleurs :

$$\cos(\theta) = \frac{H - h}{R_{b1}} \quad (1.169)$$

L'égalité (1.168) peut donc être réécrite :

$$\delta y \approx \delta d \sin(\theta) + (H - h) \delta \theta \quad (1.170)$$

$$\delta d \approx \frac{\delta y - (H - h) \delta \theta}{\sin(\theta)} \quad (1.171)$$

Compte tenu de l'approximation (1.161) :

$$\delta d \approx \frac{\delta y}{\sin(\theta)} - \frac{(H - h) \cos(\theta) \sin(\theta)}{y} (\delta y + \delta h \tan(\theta)) \quad (1.172)$$

$$\delta d \approx \frac{\delta y}{\sin(\theta)} - (H - h) \frac{\cos(\theta)}{y} (\delta y + \delta h \tan(\theta)) \quad (1.173)$$

$$\delta d \approx \delta y \left(\frac{1}{\sin(\theta)} - \frac{H - h}{y} \cos(\theta) \right) - \delta h \frac{H - h}{y} \sin(\theta) \quad (1.174)$$

Nous remplaçons δd , dans (1.154), par cette approximation :

$$\delta \varphi_{2 \rightarrow 1} \approx \frac{4\pi b \cos(\theta - \alpha_b)}{k_{st} \lambda R_{b1} \sin(\theta)} \left[\delta h + \delta y \left(\frac{1}{\sin(\theta)} - \frac{H - h}{y} \cos(\theta) \right) \cos(\theta) - \delta h \frac{H - h}{y} \sin(\theta) \cos(\theta) \right] \quad (1.175)$$

$$\delta \varphi_{2 \rightarrow 1} \approx \frac{4\pi b \cos(\theta - \alpha_b)}{k_{st} \lambda R_{b1}} [\delta y \cos(\theta) + \delta h \sin(\theta)] \left(1 - \frac{H - h}{y} \sin(\theta) \cos(\theta) \right) \frac{1}{\sin^2(\theta)} \quad (1.176)$$

Or, par ailleurs :

$$\tan(\theta) = \frac{y}{H - h} \quad (1.177)$$

L'égalité (1.176) se simplifie donc en :

$$\delta \varphi_{2 \rightarrow 1} \approx \frac{4\pi b \cos(\theta - \alpha_b)}{k_{st} \lambda R_{b1}} [\delta y \cos(\theta) + \delta h \sin(\theta)] \quad (1.178)$$

1.3.2.4. Rotondité terrestre

Les développements effectués dans ce chapitre ne prennent pas en compte la rotondité terrestre dans la formulation de l'altitude. Une correction doit donc être apportée au calcul de l'altitude, qui dépend du géoïde employé. Les travaux de cette thèse ont été réalisés sur des

images à haute résolution et, par conséquent, de fauchée réduite. L'impact de cette correction est donc *a priori* faible. Nous allons le vérifier, en supposant la Terre sphérique.

La figure 1-42 représente la différence entre les coordonnées (y, h) mesurées dans la géométrie cartésienne et les coordonnées (y_T, h_T) réellement observables dans le repère terrestre. Nous appelons R_T le rayon terrestre moyen.

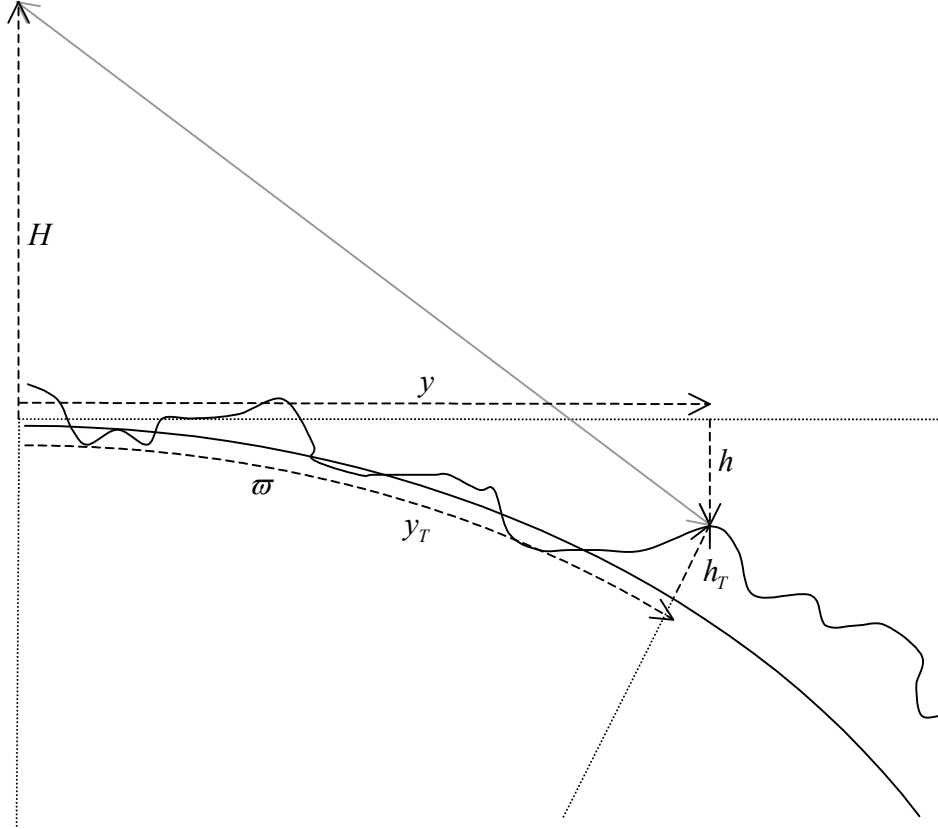


FIGURE 1-42. Écart géométrique introduit par la rotondité terrestre dans la reconstruction du relief par interférométrie radar.

Exprimons d'abord y_T en fonction de (y, h) :

$$y_T = R_T \varpi \quad (1.179)$$

$$\frac{y}{R_T + h} = \tan(\varpi) \Rightarrow \varpi = \text{Arctan}\left(\frac{y}{R_T + h}\right) \quad (1.180)$$

Pour ϖ petit, nous pouvons faire les approximations suivantes :

$$\varpi \approx \frac{y}{R_T + h} \quad (1.181)$$

$$y_T = R_T \text{Arctan}\left(\frac{y}{R_T + h}\right) \approx y \frac{R_T}{R_T + h} \quad (1.182)$$

En considérant un développement limité de cette expression à l'ordre 2 en $\frac{h}{R_T}$, nous trouvons :

$$y_T \approx y \left(1 - \frac{h}{R_T} + \frac{h^2}{R_T^2} \right) \quad (1.183)$$

Exprimons maintenant h_T en fonction de (y, h) :

$$\cos(\varpi) = \frac{R_T + h}{R_T + h_T} \quad (1.184)$$

Nous obtenons donc l'expression suivante pour h_T :

$$h_T = \frac{R_T [1 - \cos(\varpi)] + h}{\cos(\varpi)} \quad (1.185)$$

Un développement limité à l'ordre 2 en ϖ donne, en utilisant (1.181) :

$$h_T \approx h + \frac{y^2}{2R_T} \left(1 - \frac{h}{R_T} \right) \quad (1.186)$$

Les égalités (1.182) et (1.186) se traduisent, en terme d'écart de position, par :

$$y_T - y \approx -\frac{yh}{R_T} \left(1 - \frac{h}{R_T} \right) \quad (1.187)$$

$$h_T - h \approx \frac{y^2}{2R_T} \left(1 - \frac{h}{R_T} \right) \quad (1.188)$$

Dans des conditions d'observation spatiale (considérons $y = 1300 \text{ km}$ et $h \approx 0,5 \text{ km}$ en moyenne), cela signifie qu'il y a des décalages d'une centaine de mètres horizontalement et de plus d'une centaine de kilomètres verticalement. Si nous disposons d'un point de recalage au début de la fauchée (considérons 100 km de fauchée et une variation d'altitude de $0,5 \text{ km}$), le décalage lié à la rotondité terrestre est encore d'une dizaine de mètres horizontalement et de moins d'un kilomètre verticalement. L'erreur serait en revanche minime avec un capteur avec faible fauchée (comme c'est généralement le cas en haute résolution) : quelques dizaines de centimètres selon les deux axes.

Dans des conditions d'observation aéroportée (considérons $y = 4 \text{ km}$ et $h \approx 0,5 \text{ km}$ en moyenne), les décalages valent une trentaine de centimètres horizontalement et un peu plus d'un mètre verticalement. Si nous disposons d'un point de recalage en début de fauchée (considérons 1 km de fauchée et une variation d'altitude de $0,1 \text{ km}$), le décalage horizontal qui subsiste est de l'ordre du centimètre horizontalement et du décimètre verticalement.

Le sujet de cette thèse porte essentiellement sur la difficulté de la reconstruction du « 3D » sur des reliefs complexes et problématiques comme le milieu urbain. Je considérerai donc comme mineurs les problèmes de « recalage géographique », d'autant que l'interférométrie pratiquée est simultanée (dans le cas contraire, les positionnements relatifs des porteurs joueraient un rôle essentiel dans la qualité du traitement).

1.4 Conclusions

Au cours de ce chapitre, j'ai proposé un rappel sur les techniques du radar imageur, en particulier en ce qui concerne la géométrie de l'image radar et les techniques de reconstruction du relief basées uniquement sur l'amplitude de l'image.

J'ai ensuite énoncé les postulats de l'interférométrie radar et présenté les principales applications associées. J'ai abordé plus précisément la problématique de l'interférométrie stéréoscopique, du point de vue de ses principes théoriques. Les écarts aux postulats ont été

exposés et leurs implications ont été démontrées. Notamment, une nouvelle démonstration du principe du décalage spectral a été proposée.

Enfin, la technique de la reconstruction du relief par interférométrie radar a été abordée un peu plus en détail. Ce point pourrait encore être approfondi, notamment en ce qui concerne les problèmes de recalage géographique, de localisation des capteurs aéroportés et de projection dans un système géographique. Cependant, ces problèmes géométriques sortent du cadre de ma thèse et ont déjà été amplement étudiés dans le domaine de l'observation spatiale.

Nous allons plutôt nous intéresser, dans les prochains chapitres, aux obstacles possibles à la reconstruction du relief, en employant des techniques relevant du traitement du signal et du traitement d'images. Nous nous limiterons au cadre de la haute résolution (en particulier en milieu semi-urbain). Avant de me lancer dans le calcul interférométrique, j'ai choisi de reprendre le problème à sa base, c'est-à-dire au niveau de la phase, afin de vérifier le bien-fondé du raisonnement interférométrique en haute résolution.

2. Phase et haute résolution

Les principes interférométriques énoncés dans le chapitre 1 s'appuient sur des postulats amplement vérifiés en ce qui concerne l'imagerie à basse résolution. Cependant, étant donné que nous disposons aujourd'hui de données radar à haute résolution (notamment grâce aux systèmes aéroportés), nous sommes obligés de reconsidérer certaines hypothèses. Des spécificités propres à certains éléments, comme les surfaces anthropiques, peuvent en effet être observées. Ainsi, avant même d'envisager d'utiliser la phase dans le traitement interférométrique, il apparaît indispensable d'examiner le comportement de celle-ci dans le cas de la haute résolution, afin de vérifier que son essence même reste inchangée. Une partie de ce travail a été effectuée en collaboration avec Loïc Soucille, dans le cadre d'un stage de DEA.

2.1 Haute résolution en imagerie radar

2.1.1. Notion de haute résolution

2.1.1.1. Caractéristiques résolvantes d'un système ROS

Pas de pixel

La première grandeur qui définit les performances d'un système imageur est son pas de pixel. Nous avons vu dans le chapitre 1 que cette caractéristique est directement liée à la fréquence d'échantillonnage F_e et à la célérité de la lumière dans le vide c , pour l'axe des distances, et à la fréquence de répétition des impulsions électromagnétiques FRI et à la vitesse du porteur U , en ce qui concerne la coordonnée azimutale :

$$\delta_d = \frac{c}{2F_e} \quad (1.2)$$

$$\delta_{d \text{ sur sol plat}} = \frac{c}{2F_e \sin \theta} \quad (1.3)$$

$$\delta_a = \frac{U}{FRI} \quad (1.1)$$

Cependant, comme en optique, ce n'est pas cette grandeur qui détermine réellement la résolution de l'image, mais plutôt la finesse de la réponse du système à un signal du type « impulsion infiniment brève ».

Résolution

La notion de résolution définit la capacité d'un système à pouvoir séparer les réponses de deux objets ponctuels très proches. Elle mesure la distance minimale entre ces deux objets

pour que le signal produit par le second objet ne soit pas noyé dans celui produit par le premier. La résolution du capteur dépend donc de la réponse impulsionnelle du système.

Ainsi, la résolution se définit en radar par la largeur à -3 dB du lobe principal de la puissance de la réponse impulsionnelle. Nous avons vu dans le chapitre 1 que l'expression de la résolution d'un système ROS est donc inhérente à la notion de bande passante du signal (B est la modulation de fréquence du *chirp*, et D est la modulation de fréquence due à l'effet Doppler) et à un paramètre k lié au type de réponse impulsionnelle et dépendant de l'axe. La résolution est d'autant meilleure (c'est-à-dire faible) que la largeur de modulation du signal est grande :

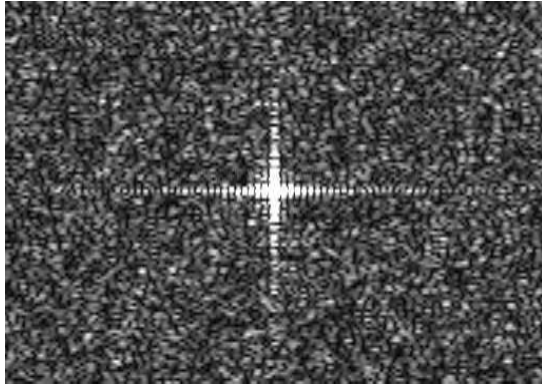
$$\Delta_d = \frac{c}{2} \frac{k_d}{B} \quad (1.11)$$

$$\Delta_{d \text{ sur sol plat}} = \frac{c}{2} \frac{k_d}{B \sin \theta} \quad (1.12)$$

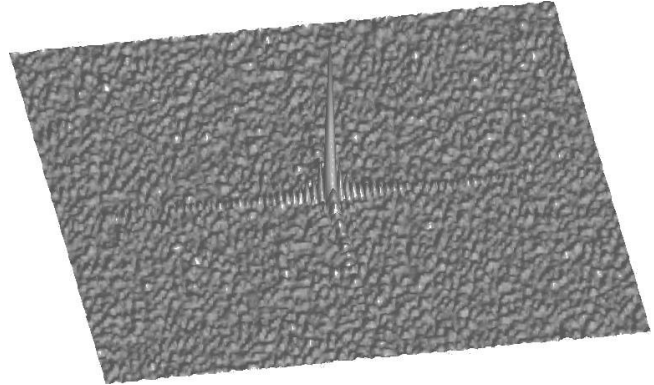
$$\Delta_a = U \frac{k_a}{D} \quad (1.21)$$

Impact des lobes latéraux

Contrairement aux systèmes optiques, la réponse impulsionnelle d'un système ROS ne décroît pas de manière monotone autour de sa réponse maximale. Les remontées de puissance associées aux lobes latéraux perturbent la lecture de l'information radiométrique de l'image, lorsqu'un objet brillant est présent. Bien qu'il s'agisse d'une simulation, la figure 2-1 donne une idée réaliste de la réponse type d'une cible ponctuelle (coin réflecteur ou construction humaine) au milieu d'une surface naturelle (par exemple, un champ). Cette réponse correspond à un sinus cardinal, et nous pouvons observer les modulations du signal selon les deux axes (distance et azimut).



a. Amplitude de l'image radar simulée.



b. Vue « 3D » de l'amplitude.

FIGURE 2-1. Simulation de la réponse d'une cible ponctuelle dans un fouillis.

2.1.1.2. Résolution après filtrage fréquentiel

Pondération du spectre

Afin de réduire l'impact de ces lobes latéraux (notamment, des lobes secondaires), des pondérations fréquentielles sont généralement appliquées. Considérons la transformée de Fourier bidimensionnelle \underline{tf} de l'image complexe \underline{z} :

$$\underline{tf} = TF_{2D} \{ \underline{z} \} \quad (2.189)$$

Une pondération du spectre par une fonction P du type « Blackman » ou « Hamming généralisé » (cf. figure 2-2) permet de réduire l'importance des lobes secondaires sur l'image ainsi filtrée \underline{z}_P , de transformée de Fourier \underline{tf}_P , fonction des fréquences en distance f_d et en azimut f_a :

$$\underline{tf}_P(f_d, f_a) = \underline{tf}(f_d, f_a) P(f_d) P(f_a) \quad (2.190)$$

$$\underline{z}_P = TF_{2D}^{-1} \{ \underline{tf}_P \} \quad (2.191)$$

La fonction de pondération de Blackman P_B , pour une bande passante en fréquence de largeur W , se définit de la façon suivante :

$$\begin{cases} \forall f \in [f_0 - W/2, f_0 + W/2], & P_B(f) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \cos\left(2\pi i \frac{f - f_0}{W}\right) \\ \forall f \notin [f_0 - W/2, f_0 + W/2], & P_B(f) = 0 \end{cases} \quad (2.192)$$

avec :

$$\sum_{i=0}^n \alpha_i = 1 \quad (2.193)$$

La fonction de pondération du type « Hamming généralisé » représente l'ensemble des cas où $n=1$. Il existe deux cas particuliers de telles pondérations :

- La pondération de Hamming (classique), pour laquelle :

$$\begin{cases} \alpha_0 = 0,54 \\ \alpha_1 = 0,46 \end{cases} \quad (2.194)$$

- La pondération de Von Hann (Hanning), pour laquelle :

$$\alpha_0 = \alpha_1 = 0,5 \quad (2.195)$$

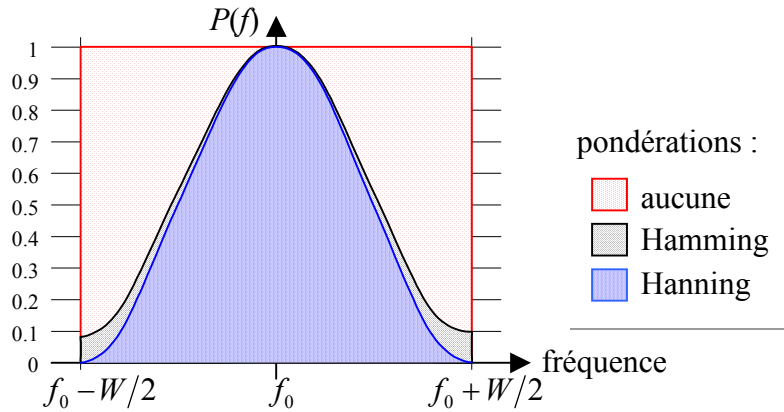
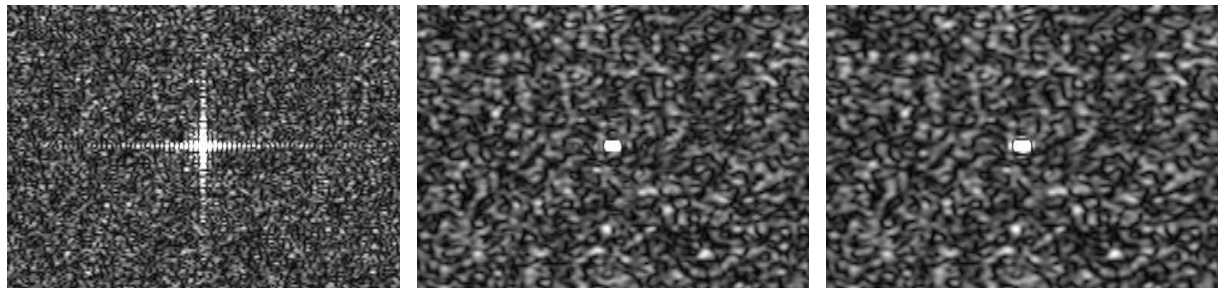


FIGURE 2-2. Exemples de fonctions de pondération.

Exemples de filtrage fréquentiel par pondération

Les figures 2-3-a,b,c illustrent les effets des pondérations ci-dessus sur la simulation de la figure 2-1-a. La perte d'énergie induite par la pondération a été corrigée, de façon à pouvoir comparer les signaux. Nous pouvons observer que les lobes latéraux ont pratiquement disparu sur les images 2-3-b et 2-3-c (les lobes secondaires subsistent partiellement dans le cas de l'image 2-3-c). En revanche, la résolution de ces deux images est dégradée. En outre, cette

technique a pour effet déplaisant d'augmenter la granulosité du *speckle*. C'est pourquoi des techniques de filtrage différentes sont généralement appliquées au fouillis incohérent et aux cibles ponctuelles cohérentes : il est alors question de filtrage adaptatif.



a. Avant pondération.

b. Après pondération par un filtre de Hamming.

c. Après pondération par un filtre de Hanning.

FIGURE 2-3. Simulation de l'amplitude d'une source ponctuelle avant et après pondération.

Le schéma 2-4 donne les profils obtenus (selon un des deux axes) pour l'amplitude de cette cible ponctuelle, avant et après pondération. Le filtrage a donc comme effet de concentrer dans le lobe principal l'énergie contenue dans les lobes latéraux. La largeur de celui-ci s'en trouve augmentée (d'où une moins bonne résolution) et son amplitude maximale a été réduite, en raison de la normalisation de l'énergie du signal. Le filtre de Hamming semble cependant réduire plus efficacement l'impact des lobes secondaires, tout en conservant une réponse un peu plus fine pour le lobe principal.

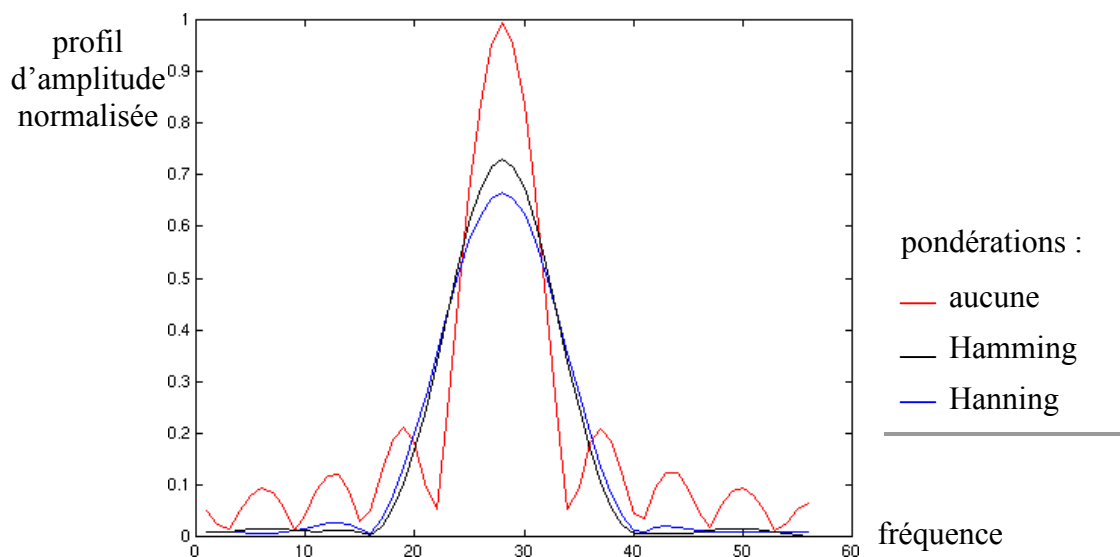


FIGURE 2-4. Profils de l'amplitude de la réponse d'une cible ponctuelle avant et après pondération (simulations).

Nouvelle résolution

Les résolutions du capteur (notées de manière générique par Δ) sont liées aux bandes passantes W (notation générique) du signal selon les deux axes, mais aussi au type de pondération (défini par un coefficient de pondération k_h associé à la réponse impulsionnelle h : cf. tableau 2-1) appliqué en fréquence sur le signal, par la relation :

$$\Delta = \frac{k_h}{W} \quad (2.196)$$

avec :

$$W = \frac{B}{c} \text{ en distance et } W = \frac{D}{U} \text{ en azimut} \quad (2.197)$$




fonction de pondération	$\forall f \in [f_0 - W/2, f_0 + W/2]$	réponse impulsionnelle h	k_h
fonction porte 	$P_{h_1}(f) = \Pi_W(f)$	h_1 : sinus cardinal	$k_{h_1} = 0,884487$
fonction de Hanning 	$P_{h_2}(f) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(2\pi \frac{f - f_0}{W} \right) \right)$	h_2 : sinus cardinal avec lobes latéraux atténués	$k_{h_2} = 1,438204$
fonction de Hamming 	$P_{h_3}(f) = 0,54 + 0,46 \cos \left(2\pi \frac{f - f_0}{W} \right)$	h_3 : sinus cardinal avec lobes latéraux atténués	$k_{h_3} = 1,300816$

TABLEAU 2-1. Coefficient de pondération associé à chaque type de réponse impulsionnelle.

2.1.1.3. Haute résolution

Définition

Le langage courant introduit une ambiguïté dans la notion de résolution puisque celle-ci est qualifiée de « haute » lorsqu'elle est numériquement faible. L'abus de langage est même parfois poussé jusqu'à l'usage du mot « faible » (*low resolution*) pour désigner une résolution médiocre, c'est-à-dire numériquement élevée. Pour éviter au maximum la confusion, nous n'emploierons pas les adjectifs « faible » et « élevée » pour qualifier la résolution. En revanche, nous emploierons les termes « haute » et « basse » communément utilisés pour désigner respectivement des résolutions fine (numériquement faible) ou médiocre (numériquement élevée).

En imagerie radar, les capteurs qualifiés de « basse résolution » ont une résolution de l'ordre de la dizaine de mètres et plus. C'est le cas de la plupart des systèmes satellitaires actuels. Les radars aéroportés bénéficient, pour leur part, des dernières technologies ROS et atteignent des résolutions métriques et inférieures. Ces capteurs sont qualifiés de « haute résolution ». Cependant, de nombreux projets en cours d'étude proposent des capteurs satellitaires radar à haute résolution (cf. tableau 2-2).

capteur	porteur	opérateur	pays	résol. moy. (m)	bandes	période d'activité
ERS 1	satellite	ESA	Europe	25	C	1991-aujourd'hui
ERS 2	satellite	ESA	Europe	25	C	1995-2002
JERS	satellite	NASDA	Japon	20	L	1992-1998
RadarSat 1	satellite	RadarSat Intl, CSA + MDA	Canada	8 à 25	C	1995-aujourd'hui
RadarSat 2	satellite	RadarSat Intl, CSA + MDA	Canada	3 à 25	C	2005-?
Envisat	satellite	ESA	Europe	25	C	2001-aujourd'hui
ALOS	satellite	NASDA	Japon	10	L	2005-?
Cosmo / Skymed	satellite	ASI, Alenia	Italie	1	X	2006-?
TerraSar	satellite	InfoTerra,	Allemagne et	1 à 3	L et X	2006-?

capteur	porteur	opérateur	pays	résol. moy. (m)	bandes	période d'activité
		Astrium	Royaume Uni			
SRTM	navette	NASA, DLR	États-Unis et Allemagne	25	C et X	2000
AER	aéroporté	FGAN	Allemagne	≤ 1	X	opérationnel
AeS	aéroporté	Intermap Technologies	États-Unis	0,5	P et X	opérationnel
AIRSAR / TOPSAR	aéroporté	JPL	États-Unis	2,5	P, L et C	opérationnel
DO-SAR	aéroporté	EADS	Allemagne	0,5	S, C, X, Ka	opérationnel
EMISAR	aéroporté	DCRS	Danemark	2	L et C	opérationnel
ESAR	aéroporté	DLR	Allemagne	1,25	P, L, C et X	opérationnel
PHARUS	aéroporté	TNO-FEL	Pays-Bas	3	C	opérationnel
Pi-SAR	aéroporté	CRL/NASDA	Japon	1,5	L et X	opérationnel
RAMSES	aéroporté	ONERA	France	≤ 1	L, S, C, X, Ku, Ka et W	opérationnel
SAR-580	aéroporté	Environment Canada	Canada	≤ 3	C et X	opérationnel
Star3i	aéroporté	Intermap Technologies	États-Unis	1,6	X	opérationnel

TABLEAU 2-2. Principaux capteurs ROS et leurs résolutions.

Données à haute résolution utilisées

Trois sources de données ont servi de base aux travaux de cette thèse :

- les simulations, dont la résolution est adaptée au contexte d'étude mais est généralement inférieure au mètre ;
- les données issues du capteur AeS (cf. tableau 2-2) de la société allemande AeroSensing (maintenant intégrée au groupe Intermap) ;
- les données issues du capteur RAMSES de l'ONERA (Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales).

Les données réelles ont visiblement été pondérées par une fonction de Hanning ou de Hamming (cf. figure 2-5).

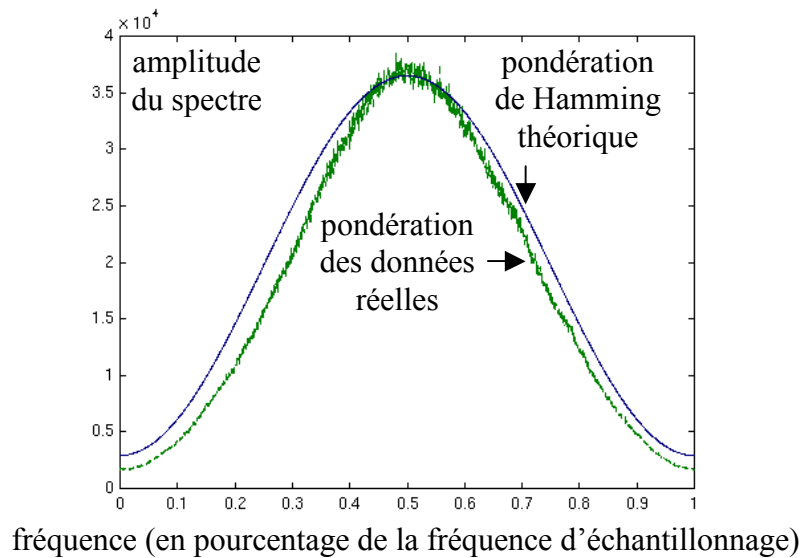


FIGURE 2-5. Amplitude du spectre des données réelles (AeS et RAMSES) à haute résolution traitées.

2.1.2. Imagerie ROS et haute résolution

2.1.2.1. Comportement de l'amplitude sur une image ROS à haute résolution

Surfaces naturelles

La modélisation statistique de l'amplitude fait l'objet d'une littérature scientifique considérable [Maître 2001]. Le chatolement a fait l'objet de modélisations, bien avant le développement des radars imageurs, puisqu'en physique du laser, Goodman a défini en 1984 [Goodman 1984] les bases d'un modèle de *speckle*. Ce modèle conduit à une distribution de probabilité de l'amplitude du type « distribution de Rayleigh » :

$$P(A) = \frac{A}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.198)$$

Bien que simpliste, cette modélisation donne des résultats plutôt satisfaisants en basse résolution et reste encore applicable aux hautes résolutions pour certaines surfaces naturelles. Les figures 2-6-a et 2-6-b donnent les histogrammes de l'amplitude obtenus pour les images d'une prairie et d'une zone de culture. Les lois de Rayleigh ajustées aux données²² ont été représentées et nous pouvons observer qu'elles approchent de manière acceptable les distributions. Il n'en va pas de même pour les zones de forêt (*cf.* figures 2-6-c et 2-6-d). En effet, la notion de texture intervient de manière importante dans le cas de la forêt. Or, celle-ci n'est pas prise en compte dans le calcul statistique. Notamment, la présence de nombreuses zones d'ombre invalide les hypothèses d'homogénéité (donc de stationnarité) de la zone étudiée.

²² L'ajustement est réalisé en calculant la variance de l'intensité sur l'ensemble des données.

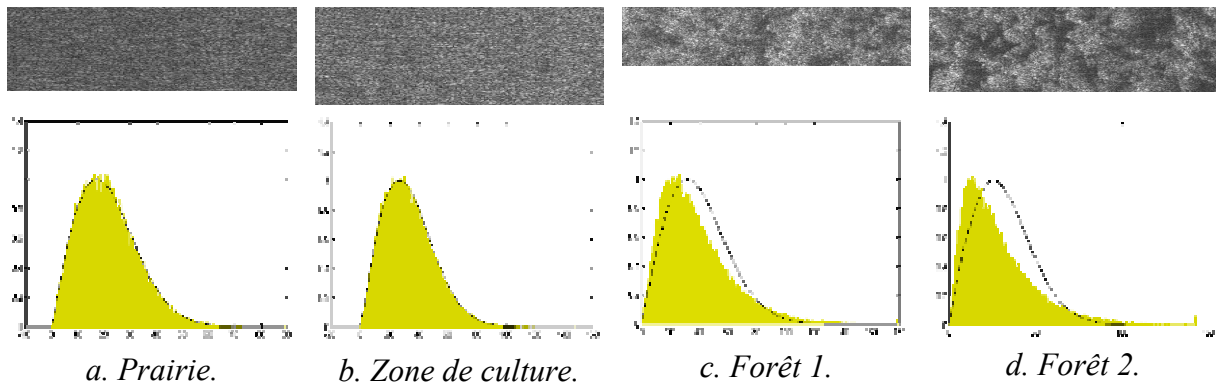


FIGURE 2-6. Histogrammes de l'amplitude et loi de Rayleigh ajustée aux données pour quatre images (Aerosensing).

Surfaces anthropiques

Les surfaces anthropiques (issues de l'activité humaine) ne respectent plus les lois statistiques de la basse résolution, et ceci pour deux raisons essentielles :

- Une surface anthropique inclut de nombreuses hétérogénéités aux caractéristiques radicalement différentes les unes des autres (*cf.* la zone semi-urbaine de la figure 2-7-a).
- Les constructions humaines présentent de nombreux coins, qui se comportent comme des trièdres ou des dièdres et renvoient donc de puissants échos (saturation de l'histogramme de la figure 2-7-a).

Il est donc délicat de parler de « surface » anthropique, dans la mesure où il est difficile de trouver des « surfaces » pour lesquelles les propriétés statistiques de l'amplitude de l'image restent stationnaires dans l'espace. Les modèles approchant le mieux ce genre de statistique sont ceux fondés sur des lois de mélange [Nicolas 1999, Nicolas 2001].

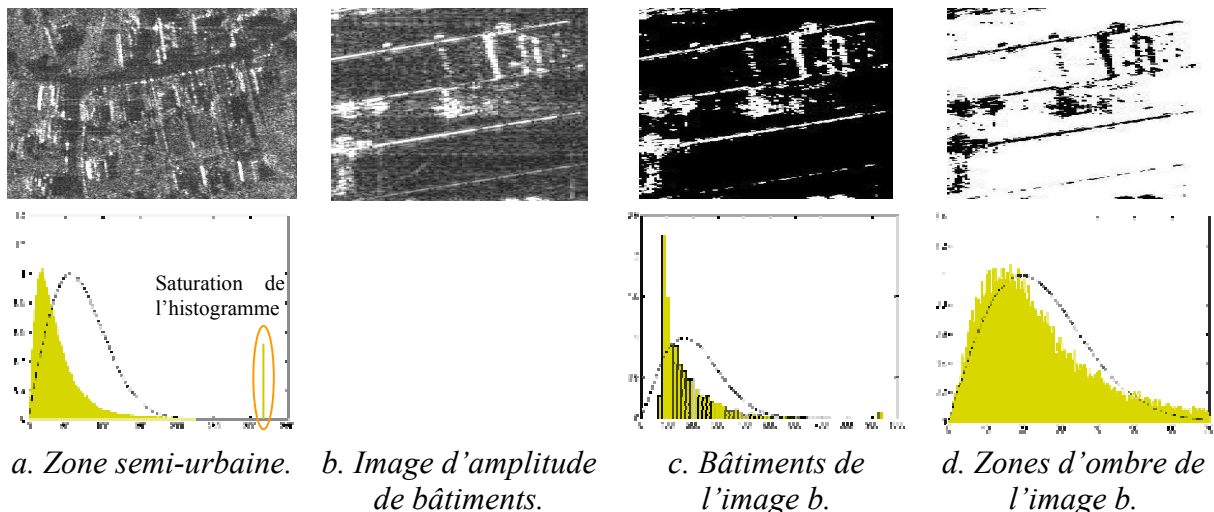


FIGURE 2-7. Histogrammes de l'amplitude et loi de Rayleigh ajustée aux données. Afin d'étudier la statistique du speckle, deux masques ont été appliqués à l'image b pour différencier les éléments de bâtiments de radiométrie élevée (image c) de ceux des zones d'ombre (image d).

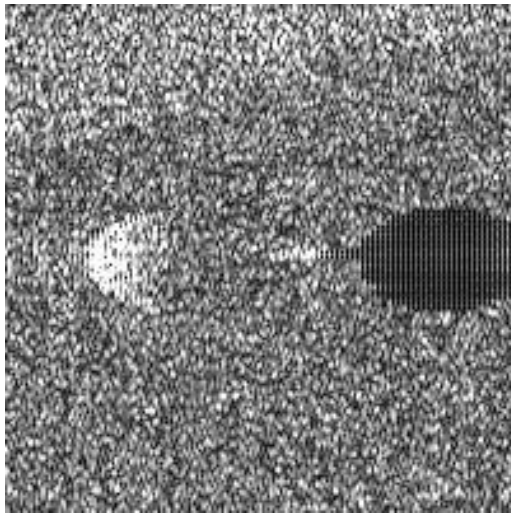
2.1.2.2. Comportement de la phase sur une image ROS à haute résolution

Théorie

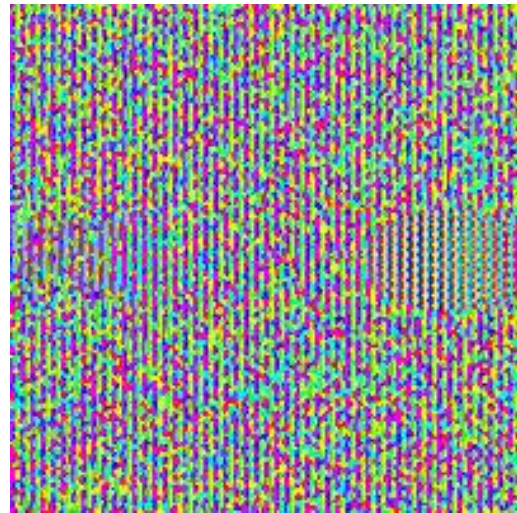
En ce qui concerne le cas de la basse résolution, la phase est considérée comme spatialement aléatoire mais temporellement corrélée (*cf.* chapitre 1), c'est-à-dire qu'elle traduit des propriétés fines de la surface qui ne sont pas stationnaires dans l'espace mais faiblement variables dans le temps. Cela lui confère un comportement stochastique, d'un point de vue spatial. En revanche, nous pouvons supposer que les spécificités observées sur la statistique de l'amplitude pour la haute résolution risquent d'avoir des répercussions sur la statistique de la phase, qui pourrait ne plus être aléatoire. De surcroît, dans la mesure où la résolution commence à approcher sensiblement la longueur d'onde d'observation, nous pouvons également présumer que la phase va refléter un comportement beaucoup plus déterministe, caractéristique des propriétés intrinsèques de la surface (type de matériau, rugosité...).

Simulations

Dès mes premières simulations d'images à haute résolution, j'ai pu en effet observer un comportement curieux de la phase, dans certains cas de simulation : la phase comportait des motifs linéiques verticaux périodiques en distance. Cette propriété se manifeste lorsque la surface étudiée possède des caractéristiques stationnaires (diélectricité, rugosité) et plus particulièrement lorsque la résolution tend vers la longueur d'onde. Même pour des surfaces présentant une forte rugosité et un *speckle* marqué (*cf.* figure 2-8-a), ce phénomène apparaît pour une résolution suffisamment fine (*cf.* figure 2-8-b). Mais ce motif vertical se manifeste également à des résolutions moins fines, lorsque la surface est peu rugueuse.



a. Amplitude.



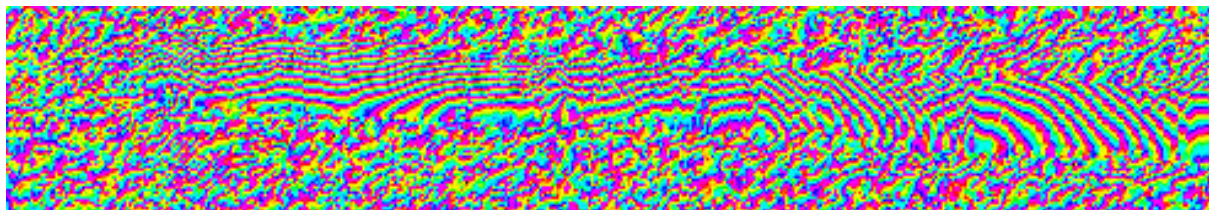
b. Phase.

FIGURE 2-8. Simulation de l'image d'un arbre dans un champ aux propriétés stationnaires (rugosité, diélectricité), pour $\Delta = 2,25 \lambda$ et un sur-échantillonnage d'un facteur 2 par zéro-padding (technique qui consiste à élargir artificiellement le spectre en ajoutant des zéros de chaque côté).

Données réelles

Dans un premier temps, les motifs verticaux observés sur les images simulées ont été attribués à des défauts de simulation, jusqu'à ce que nous observions des phénomènes similaires sur des images réelles. Bien que l'image de la figure 2-9-a ressemble à un interférogramme, elle représente toutefois une simple image de phase. L'objet produisant ce motif est une longue traverse métallique (cf. figures 2-9-b et 2-9-c) qui présente certainement des propriétés diélectriques homogènes sur la surface et une faible rugosité. Ceci pourrait donc correspondre au phénomène observé lors des simulations, mais pourrait également être dû à un phénomène d'*aliasing*, dans le cas où la fréquence d'échantillonnage est un multiple de la fréquence d'un motif rugueux périodique.

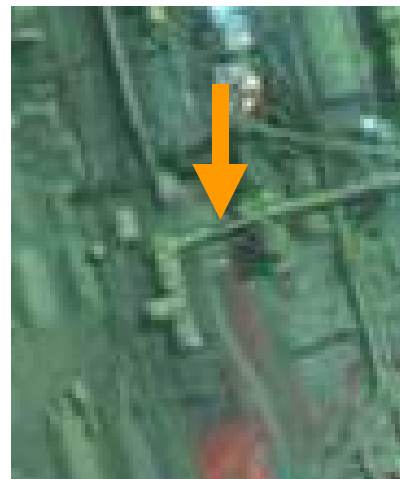
La présence de ce phénomène inexpliqué nous a donc amenés à étudier le comportement plus spécifique de la phase pour les hautes résolutions.



a. Image de phase à haute résolution.



b. Photographie aérienne (ONERA).



c. Image Ikonos (CNES).

FIGURE 2-9. Traverse métallique sur une image à haute résolution.

2.2 Corrélation spatiale de la phase

2.2.1. Estimation de la corrélation spatiale de la phase

2.2.1.1. Estimateurs

Pertinence de la phase

Le but de ce chapitre est d'estimer dans quelle mesure la phase d'un pixel est corrélée avec celle de ses voisins. Il existe de nombreux moyens pour estimer la corrélation d'un signal complexe avec lui-même, cependant ici nous ne nous intéressons qu'à la phase. Nous ne pouvons pas l'extraire du signal complexe, pour la traiter indépendamment de l'amplitude,

sans nous heurter au problème du déroulement de phase (et en particulier au problème du modulo). Deux démarches sont possibles :

- Soit nous considérons que la valeur de la phase d'un pixel est toujours valide et nous pouvons donc normaliser le signal par son amplitude, afin de n'étudier que le comportement de la phase.
- Soit nous considérons que la valeur de la phase est moins pertinente lorsque l'amplitude est faible (le bruit de la phase devient alors non négligeable) et dans ce cas nous travaillons directement sur le signal complexe non normalisé (la prise en compte de la phase est donc pondérée par son amplitude).

Fonction d'autocorrélation

Puisque nous cherchons à mesurer la corrélation de la phase d'un pixel avec celle de ses voisins, la fonction d'autocorrélation semble appropriée. Celle-ci permet de mesurer la décroissance de la corrélation $\underline{c}(\tau_x, \tau_y)$ du signal avec lui-même, en fonction d'un décalage spatial (τ_x, τ_y) . Elle est estimée sur une fenêtre de taille $L_x \times L_y$:

$$\underline{c}(\tau_x, \tau_y) = \frac{\sum_{k=1}^{L_x-\tau_x} \sum_{l=1}^{L_y-\tau_y} (\underline{z}(k, l) - \bar{\underline{z}})(\underline{z}(k + \tau_x, l + \tau_y) - \bar{\underline{z}})}{\sum_{k=1}^{L_x} \sum_{l=1}^{L_y} (\underline{z}(k, l) - \bar{\underline{z}})(\underline{z}(k, l) - \bar{\underline{z}})}, \text{ avec } \bar{\underline{z}} = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{k=1}^{L_x} \sum_{l=1}^{L_y} \underline{z}(k, l) \quad (2.199)$$

Cependant cette fonction n'est pas adaptée, car elle ne fournit pas directement une mesure locale de la corrélation de la phase dans l'espace. Pour obtenir une mesure locale il est nécessaire de considérer une fenêtre autour de chaque point de l'image et d'analyser la décroissance de $|\underline{c}|$ en fonction de la distance de corrélation (τ_x, τ_y) . Nous utiliserons donc peu cet estimateur, sauf pour des régions particulières où nous souhaiterons mesurer la portée de la corrélation.

Modélisation du comportement de la phase

A priori, si nous excluons la corrélation inter-pixels induite par la réponse impulsionnelle, la phase d'un pixel est indépendante de celle de ses voisins. Elles ne peuvent être liées que si un phénomène déterministe, stationnaire spatialement, existe. Nous allons donc chercher à évaluer la contribution d'un signal déterministe hypothétique par rapport au signal stochastique. En interférométrie, nous disposons de la cohérence [Touzi 1999] pour estimer la stabilité de la phase, mais nous ne disposons ici que d'une seule image. Nous allons donc faire les hypothèses suivantes sur le signal radar :

- Les conditions d'ergodicité et de stationnarité sont localement vérifiées (hypothèses standard pour l'usage de l'estimateur de cohérence [Touzi 1998]).
- Le signal peut être décomposé en deux parties : une composante déterministe représentée par le modèle $\Phi(x, y)$ et une composante aléatoire [Petit 1999].

Pour estimer la contribution de la composante déterministe, nous pouvons définir deux nouveaux estimateurs de cohérence pour M échantillons d'une seule image $\underline{z}(x, y)$:

$$\gamma_\Phi = \left| \sum_{k=1}^M \frac{\underline{z}(x_k, y_k)}{|\underline{z}(x_k, y_k)|} \exp(-j\Phi(x_k, y_k)) \right| \quad (2.200)$$

$$\gamma_A = \frac{\left| \sum_{k=1}^M \underline{z}(x_k, y_k) \underline{z}(x_k, y_k) \exp(-j\Phi(x_k, y_k)) \right|}{\sqrt{\sum_{k=1}^M \underline{z}(x_k, y_k) \underline{z}^*(x_k, y_k)}} \quad (2.201)$$

Le premier de ces estimateurs correspond à l'hypothèse précédente, selon laquelle la valeur de la phase est toujours pertinente, tandis que le second correspond au cas où l'amplitude entre en ligne de compte pour quantifier sa validité. Dans une première étude, nous avons utilisé un troisième estimateur de cohérence (similaire au second) mais qui n'était pas réellement satisfaisant pour étudier le comportement spatial de la phase et dont nous ne présenterons pas les résultats ici [Petit 2001b].

Paradoxalement, ces définitions d'estimateurs de la corrélation spatiale ne font pas intervenir directement la disposition spatiale des M échantillons. En effet, leur localisation n'intervient pas explicitement dans la formulation. Cependant, la disposition spatiale intervient par le biais du modèle de phase $\Phi(x, y)$. Les échantillons qui s'écartent de ce modèle font décroître la cohérence et sont considérés comme des contributions au signal stochastique. C'est donc la fenêtre d'estimation du modèle de phase qui détermine l'ensemble des M échantillons (pixels).

À ce stade, nous ne connaissons pas le phénomène qui produit la corrélation spatiale du signal de phase. Le modèle de franges est donc estimé à partir d'un gradient local moyen de la phase. Des modèles plus élaborés pourraient être utilisés, comme ceux proposés par Trouvé [Trouvé 1996]. Cependant, la présence d'un signal déterministe ne présente d'intérêt réel que si la phase est prédictible. Or, si des modèles plus complexes sont requis, cela signifie que cette opération est difficile. Nous ne nous intéresserons donc qu'au modèle simple du plan de phase (fondé sur le gradient local moyen).

2.2.1.2. Corrélation induite par la réponse impulsionnelle

Le signal radar est souvent sur-échantillonné, et la réponse impulsionnelle corrèle donc les pixels entre eux. Son effet sur le *speckle* est déjà bien connu [Lopès 1999, Maître 2001]. Nous devons donc estimer son rôle sur la corrélation de la phase afin de dissocier son impact de celui lié à un phénomène déterministe.

Dans ce but, j'ai généré une image de phase aléatoire, dont la réponse impulsionnelle est celle qui est associée au système (en l'occurrence, une pondération proche de celle de Hamming). Le biais d'un estimateur de la corrélation spatiale de la phase est d'autant plus fort que la fenêtre d'estimation est petite. J'ai mesuré cette corrélation en fonction du nombre d'échantillons (*cf.* figure 2-10).

Sauf mention contraire, toutes les mesures ont été effectuées avec des fenêtres 10×10 , c'est-à-dire sur 100 échantillons.

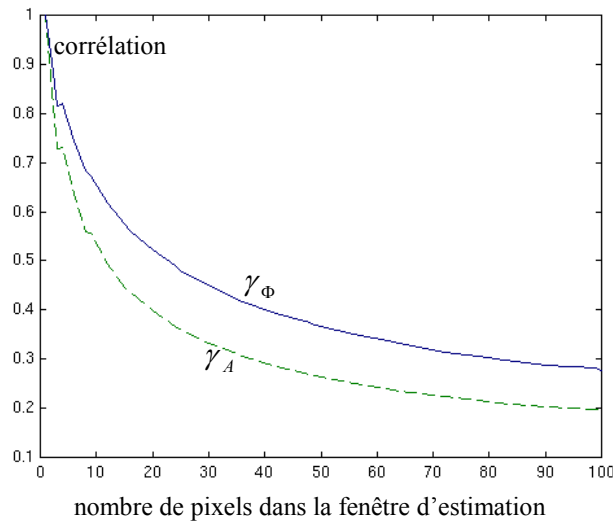


FIGURE 2-10. Évolution de la corrélation de la phase sur une image de phase aléatoire, pondérée en fréquence de manière identique aux données réelles (cf. figure 2-5), en fonction du nombre d'échantillons.

La corrélation de la phase attendue vaut donc 0,3 et 0,2, respectivement pour γ_{Φ} et γ_A , pour une image dont la phase est spatialement aléatoire et pondérée en fréquence de manière identique aux données réelles.

2.2.2. Mesures sur des données réelles

2.2.2.1. Remarque sur les mesures de corrélation spatiale de phase

Sauf mention contraire, l'estimateur employé pour le calcul de la corrélation spatiale de phase est l'estimateur γ_{Φ} . Les images de mesures de corrélation spatiale de phase présentées dans cette section ont été réalisées sur des imagerie, en raison de la facilité de manipulation d'un tel format. Cependant il faut noter que le calcul de corrélation spatiale de phase s'appuie sur des moyennes spatiales : soit sur calcul du gradient local moyen pour le modèle déterministe du comportement de la phase et soit sur un calcul de la corrélation spatiale proprement dite. Cela signifie que les résultats obtenus en bord d'imagette sont moins précis et biaisés du fait du nombre réduit d'échantillons employés par l'estimateur en bord d'imagette.

2.2.2.2. Surfaces naturelles

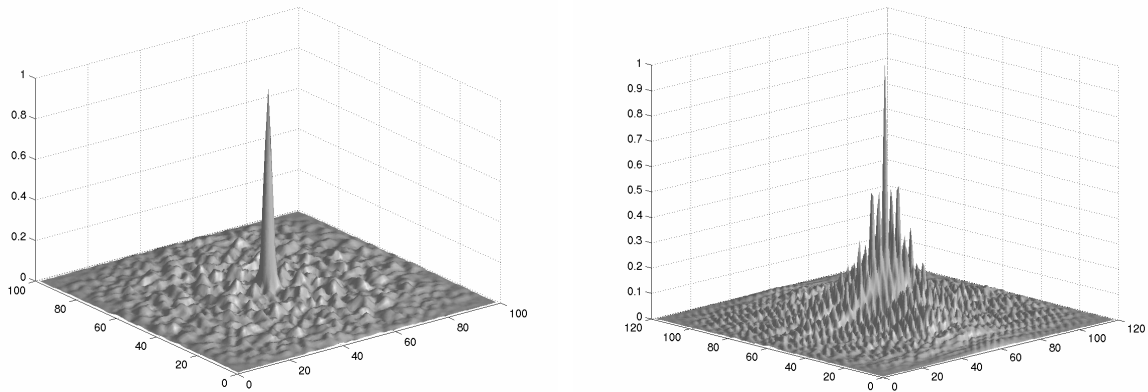
Plaines, végétation

Les mesures effectuées sur les surfaces naturelles confirment statistiquement l'hypothèse d'une phase spatialement aléatoire. Le rapport entre la résolution et la longueur d'onde n'est en tous cas pas suffisamment faible pour introduire un comportement déterministe sur ces surfaces.

Banc de sable

Des cas de corrélation de la phase ont pu être observés sur des bandes côtières. Ne disposant pas d'information sur l'état de la marée au moment de l'acquisition, nous ne sommes pas en mesure de dire s'il s'agit d'une zone de banc de sable ou de mer.

Nous avons généré une image de phase aléatoire caractéristique d'un bruit blanc, puis son spectre a été pondéré de manière à reproduire le comportement des capteurs réels (même pondération et même rapport entre résolution et pas de pixel). La fonction d'autocorrélation est semblable à une fonction de Dirac, comme nous pouvions le supposer (*cf.* figure 2-11-a). Si nous comparons avec la fonction d'autocorrélation obtenue sur un morceau de cette bande côtière (*cf.* figure 2-11-b), nous constatons que la phase est très largement corrélée spatialement (autocorrélation supérieure au bruit sur une distance de plusieurs dizaines de pixels).



a. Cas d'une image de phase aléatoire. b. Cas d'une zone côtière sur une image réelle.

FIGURE 2-11. Représentation « 3D » de la fonction d'autocorrélation calculée sur une image simulée et sur une image réelle.

Nous devons cependant considérer que la radiométrie est sans doute trop faible pour être significative et que nous observons peut-être la corrélation de la phase induite par une défocalisation (défaut du procédé de synthèse radar). Dans ce cas, cela signifie que le bruit mesuré n'est pas aléatoire, du point de vue du comportement de la phase.

2.2.2.3. Éléments brillants

Objets ponctuels et étendus

La corrélation de la phase est particulièrement observable sur les objets de forte radiométrie. La puissance du signal renvoyé impose la signature cohérente de l'objet aux pixels adjacents.

Cette propriété est particulièrement vraie pour les réponses d'objets ponctuels ou présentant un comportement proche de celui d'un dièdre ou d'un trièdre. L'estimateur de la corrélation spatiale de la phase est alors sensiblement équivalent à un estimateur spectral de la stabilité de la phase en raison de la portée spatiale des lobes secondaires. Cependant, cet effet peut également être observé sur des objets étendus (*cf.* figures 2-12 et 2-13).

La figure 2-12-a représente la radiométrie d'un objet inconnu mais particulièrement brillant. Sa phase (*cf.* figure 2-12-b) semble avoir un comportement cohérent et nettement différent des pixels du voisinage. Le radar est passé sur la gauche de l'image et le signal cohérent se prolonge en distance dans l'image. Il s'agit probablement de la suite de l'objet. La partie plus lumineuse peut correspondre à une partie orientée vers le radar ou à un double rebond sur la façade de l'objet. L'image du gradient de la phase (*cf.* figure 2-12-c) représente la direction du gradient local moyen en fonction de la couleur. L'objet et son prolongement apparaissent nettement contrastés et différents de leur environnement.

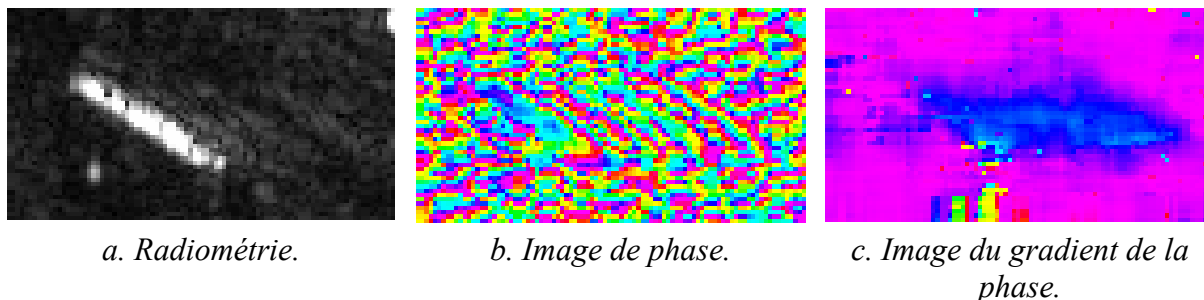


FIGURE 2-12. Exemple d'objet étendu présentant une forte corrélation de la phase (objet non identifié et intitulé « Brillant750 » sur une image RAMSES).

Comportements plus complexes

La figure 2-13 présente une image dont la partie cohérente coïncide avec l'objet brillant. L'œil peut distinguer deux comportements de la phase différents sur l'image de phase, correspondant à deux zones radiométriques différentes. Le signal de la deuxième zone semble également avoir une phase spatialement cohérente, mais la fréquence du motif de franges est trop importante pour être reconnue par l'estimateur de la corrélation spatiale de la phase.

En effet, pour que l'estimation soit correcte, il est nécessaire d'estimer les paramètres du modèle local de franges (en l'occurrence, un plan) avant de le soustraire. Cette estimation se fait par calcul d'un gradient local moyen. Ce dernier est imprécis lorsque les fréquences sont élevées (la phase tourne trop rapidement dans la fenêtre d'estimation). Le calcul de la corrélation de la phase est donc biaisé pour le signal de la deuxième zone.

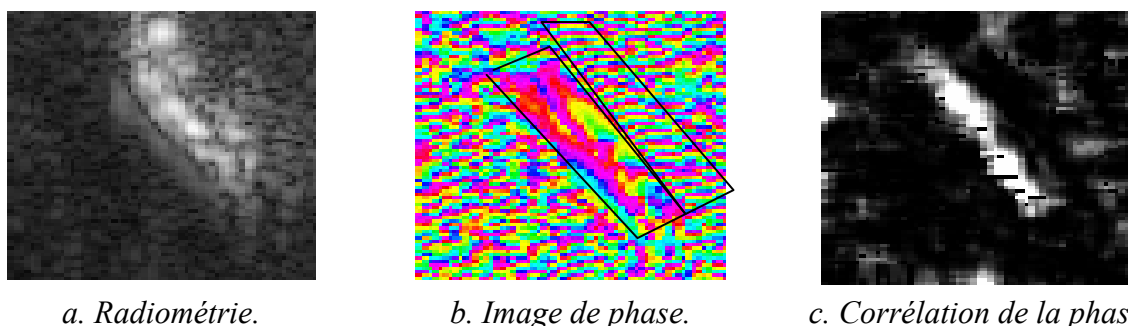


FIGURE 2-13. Exemple d'objet étendu présentant une forte corrélation de la phase (objet non identifié et intitulé « Brillant2420 » sur une image RAMSES).

2.2.2.4. Surfaces anthropiques

Bâtiments

Les murs de bâtiments, étant peu rugueux, font de bons candidats à une corrélation spatiale de la phase, d'après le modèle. Cependant, ils ont aussi une radiométrie faible et masquée par des comportements de dièdres et de trièdres (façades, coins de fenêtre...). La figure 2-14 présente une partie des murs d'une aciérie. Celle-ci est fortement susceptible de présenter des parties métalliques, comme par exemple de la tôle ondulée, qui contribuent à la cohérence du signal de phase.

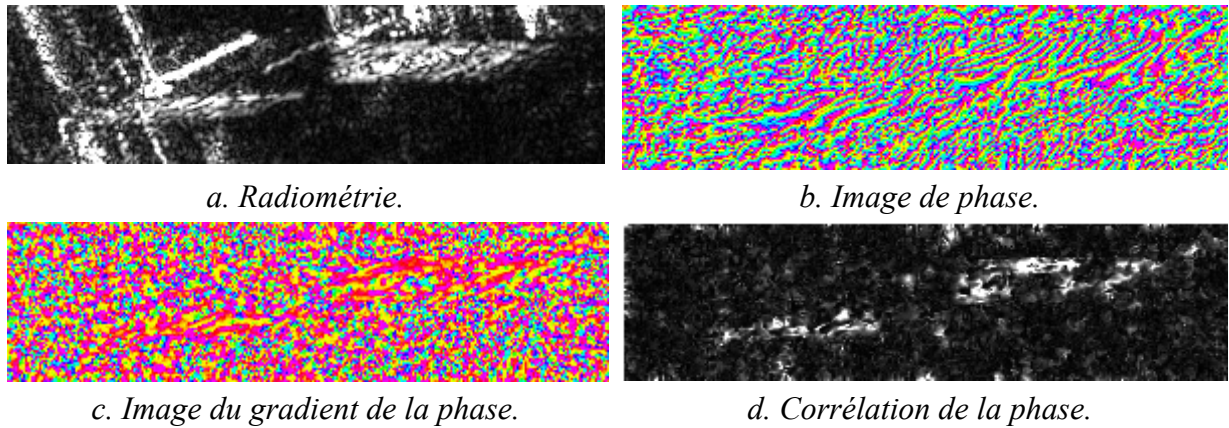


FIGURE 2-14. Comportement de la phase sur des murs d'une aciérie (image RAMSES).

Constructions métalliques

D'une manière générale tous les objets métalliques ayant une surface suffisamment importante génèrent une forte corrélation spatiale de la phase. La grue (cf. figure 2-15), le wagon (cf. figure 2-16) et la traverse métallique (cf. figure 2-17) issue de l'image 2-9-a sont quelques exemples d'objets présentant une corrélation de la phase élevée.

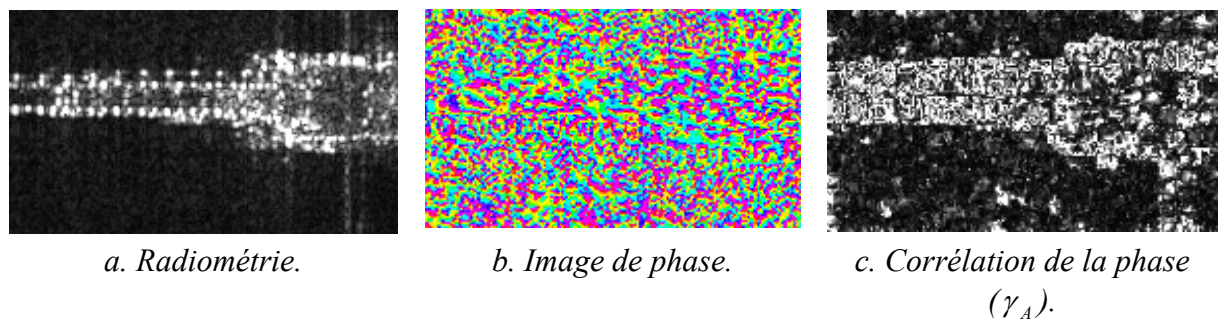


FIGURE 2-15. Comportement de la phase dans le cas d'une grue métallique.

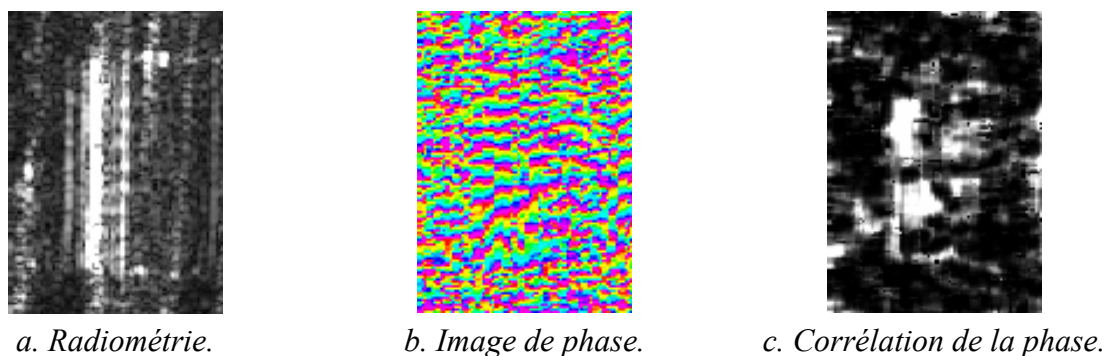
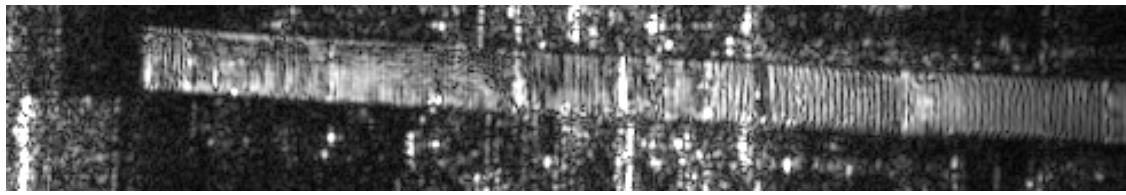
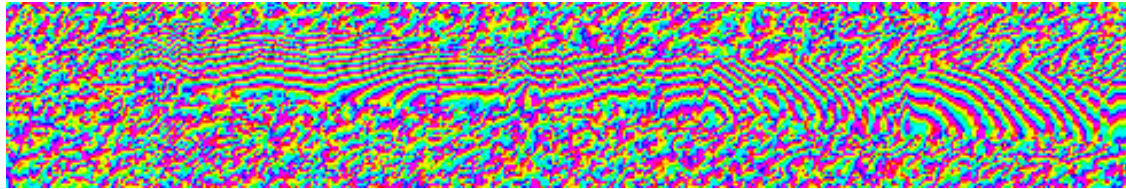


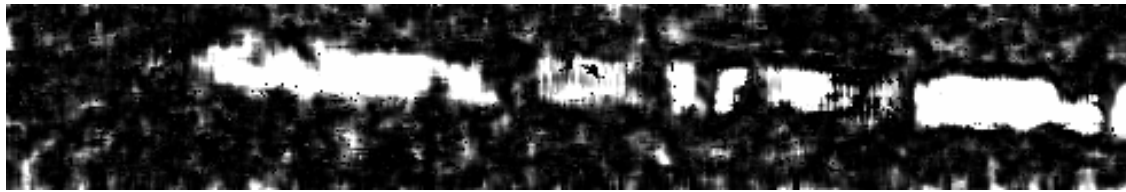
FIGURE 2-16. Comportement de la phase dans le cas d'un wagon.



a. Radiométrie.



b. Image de phase.



c. Corrélation de la phase.

FIGURE 2-17. Comportement de la phase sur une traverse métallique. Il s'agit de la traverse métallique précédemment identifiée (cf. figure 2-9).

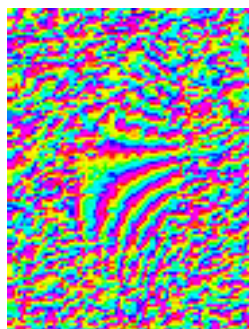
2.2.2.5. Artéfacts

Zones d'ombre

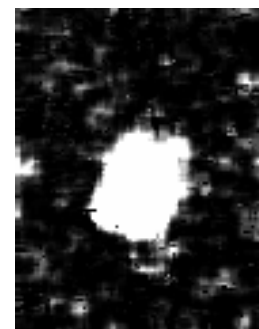
Nous venons de souligner l'aptitude de certains éléments brillants à corrélérer la phase spatialement dans l'image. Ils peuvent produire le même effet lorsqu'ils sont éclairés par un lobe secondaire de l'antenne. Dans l'image de la figure 2-18, la radiométrie mesurée est faible puisqu'il s'agit d'une zone d'ombre. Cependant, la trace d'un signal apparaît sensiblement. Il s'agit d'un artéfact d'un objet très lumineux localisé plus avant en azimut. La distance en nombre de pixels entre ce signal « fantôme » et l'objet correspond au taux de compression en azimut. Cela signifie que ce signal est bien superposable à celui de l'objet très lumineux placé dans un lobe secondaire de l'antenne. Sur l'image de phase de cet artéfact, nous pouvons noter que la phase est particulièrement corrélée spatialement, comme le confirme la figure 2-18-c.



a. Radiométrie.



b. Image de phase.



c. Corrélation de la phase.

FIGURE 2-18. Comportement de la phase dans une zone d'ombre.

La figure 2-19 illustre également le cas d'un artéfact qui produit une corrélation spatiale de la phase. L'effet est plus localisé et correspond probablement à un écho fantôme d'un dièdre.

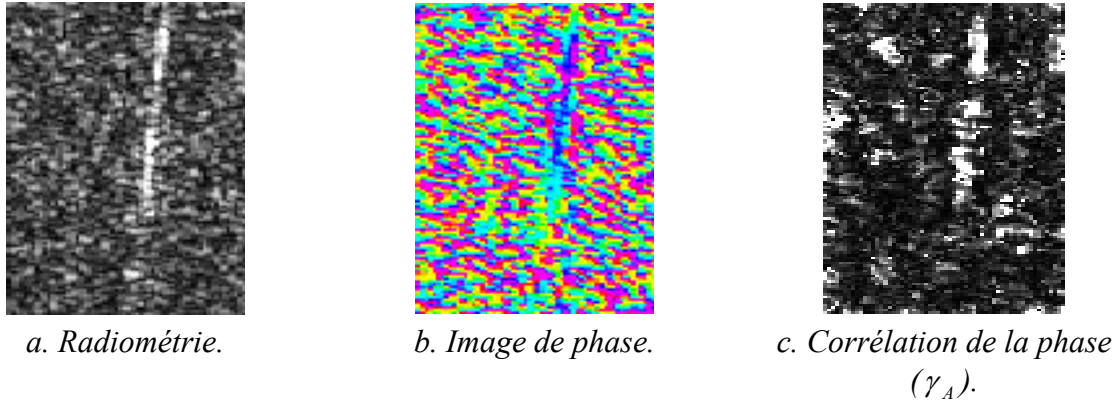


FIGURE 2-19. Comportement de la phase dans le cas d'un artéfact. Il s'agit d'une image fantôme d'un objet à forte radiométrie, observé dans un lobe secondaire de l'antenne.

2.3 Modélisation statistique pour des surfaces homogènes²³

2.3.1. Modélisation de la phase

2.3.1.1. Modèle de Goodman

Nous avons vu (cf. paragraphe 2.1.2.1) que la statistique de l'amplitude, pour des surfaces homogènes, a fait l'objet d'une littérature scientifique prolifique [Maître 2001]. Le modèle de Goodman a servi de référence et de nombreux modèles plus élaborés s'en sont inspirés ou non [Maître 2001]. Mais tous réduisent la statistique de la phase à sa plus simple expression : la distribution uniforme.

Le postulat de la plupart de ces modèles est de considérer la résolution du capteur suffisamment grande, par rapport à la longueur d'onde, pour que la surface puisse être discrétisée en un ensemble fini de N diffuseurs élémentaires ponctuels localisés en (x_k, y_k) et de coefficients de rétrodiffusion $a_k e^{j\phi_k}$. L'axe des x correspond à l'azimut, l'axe des y à la distance et (x_k, y_k) correspond à un couple de valeurs non entières, contrairement aux coordonnées désignées par la notation (u, v) .

La réponse \underline{E}_N mesurée par un pixel en (x_0, y_0) est alors, pour un capteur de réponses impulsionnelles h_x et h_y :

$$\underline{E}_N = \sum_{k=1}^N a_k e^{j\phi_k} h_y(y_k - y_0) h_x(x_k - x_0) \quad (2.202)$$

²³ En radar, une région homogène désigne une surface dont les propriétés de rétrodiffusion sont stationnaires. Cela signifie que les propriétés statistiques de diélectricité, rugosité, polarisation, humidité sont invariantes dans la région. Plus les moments restent stationnaires jusqu'à un ordre élevé, plus nous pouvons considérer que la surface est homogène.

Les hypothèses du modèle de Goodman sont les suivantes :

- Le nombre N de réflecteurs élémentaires est suffisamment grand pour permettre d'utiliser le théorème central limite et d'employer des distributions gaussiennes.
- La phase ϕ_k et l'amplitude a_k du signal renvoyé par chaque réflecteur k sont indépendantes entre elles.
- Les phases ($\phi_k, \phi_{k+1} \dots$) des réflecteurs, de même que leurs amplitudes, sont indépendantes entre elles.
- La phase est uniformément distribuée sur $[0, 2\pi[$.

Cette modélisation conduit à une distribution de Rayleigh pour l'amplitude, et à une distribution équiprobable pour la phase. Nous proposons une modification de ce modèle simple afin de fournir une nouvelle représentation statistique de la phase.

2.3.1.2. Extension du modèle de phase de Goodman

Ce modèle a été élaboré en collaboration avec Loïc Soucille. Nous remplaçons la dernière hypothèse du modèle de Goodman par une hypothèse fondamentale en interférométrie, et nous ajoutons une contrainte :

- La phase du réflecteur k est liée à la distance y_k parcourue par l'onde (de longueur d'onde λ) dans son aller-retour du capteur à la cible :

$$\phi_k = \frac{2\pi}{\lambda} 2y_k \quad (2.203)$$

- La réponse totale est l'intégration sur la surface du pixel (de dimensions $\delta_a \times \delta_d$ et de coordonnées (x_0, y_0)) des réponses impulsionnelles h produites par chaque cible, y compris celles qui sont extérieures au pixel. Cela signifie que l'échantillonneur est de type « fonction porte » de dimensions $\delta_a \times \delta_d$.

La figure 2-20 traduit cette contrainte. Les réponses impulsionnelles sont symbolisées par des taches présentant une symétrie radiale, de luminosité décroissante. Ces réponses complexes s'ajoutent là où les taches se recouvrent. En pratique, le nombre de cibles ponctuelles employées pour la modélisation est bien plus important que sur cette figure.

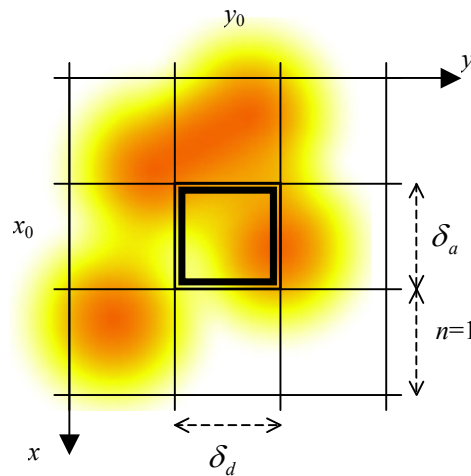


FIGURE 2-20. La réponse mesurée au sein d'un pixel est modélisée à partir d'une somme de réponses impulsionnelles.

La prise en compte des contributions des réponses impulsionnelles des cibles appartenant aux pixels adjacents oblige à une redéfinition de l'expression (2.202) de \underline{E}_N . Nous devons :

- Considérer l'intégrale de la somme des réponses sur le pixel, de dimensions $\delta_a \times \delta_d$, plutôt que la simple somme des contributions de toutes les cibles.
- Prendre en compte les cibles des n pixels adjacents selon les quatre directions (c'est-à-dire sur $(2n+1) \times (2n+1)$ pixels), avec n tendant vers l'infini.

Le nombre N représente toujours le nombre de cibles par pixel (nous supposons que le nombre de cibles par pixel est uniforme), mais le nombre total de cibles intervenant dans la définition de la réponse est quant à lui $(2n+1)^2 N$. La nouvelle expression de la réponse \underline{E}_N mesurée par un pixel en (x_0, y_0) est alors :

$$\underline{E}_N = \int_{x_0 - \delta_a/2}^{x_0 + \delta_a/2} \int_{y_0 - \delta_d/2}^{y_0 + \delta_d/2} \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^{(2n+1)^2 N} a_k e^{j\phi(y_k)} h_y(y_k - y) h_x(x_k - x) dy dx \quad (2.204)$$

2.3.2. Analyse statistique du nouveau modèle

2.3.2.1. Décomposition de l'intégrale (2.204)

Nous allons chercher à estimer l'espérance du champ complexe \underline{E}_N . En supposant que N est très grand (voir le détail complet dans le paragraphe 5.3.2), ce calcul peut être décomposé en deux intégrales :

$$A_a(\delta_a) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[H_x\left(s + \frac{\delta_a}{2}\right) - H_x\left(s - \frac{\delta_a}{2}\right) \right] ds \quad (2.205)$$

$$A_d(\delta_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\phi(y_0+t)} \left(H_y\left(t + \frac{\delta_d}{2}\right) - H_y\left(t - \frac{\delta_d}{2}\right) \right) dt \quad (2.206)$$

où H désigne la primitive de h et :

$$E[\underline{E}_N] = \frac{N}{\delta_d \delta_a} E[a_k] A_a(\delta_a) A_d(\delta_d) \quad (2.207)$$

2.3.2.2. Réponse de type sinus cardinal

Nous pouvons considérer que les systèmes ROS ont généralement une réponse impulsionnelle similaire à celle du sinus cardinal (fonction sinC, de primitive sinCint) et ainsi :

$$h_x(u) = h_y(u) = h(u) = \text{sinC}\left(\frac{k_h \pi}{\Delta} u\right) \quad (2.208)$$

$$H_x(u) = H_y(u) = H(u) = \frac{\Delta}{k_h \pi} \text{sinCint}\left(\frac{k_h \pi}{\Delta} u\right) \quad (2.209)$$

où k_h désigne la constante telle que Δ représente la résolution à -3dB de la réponse impulsionnelle. Dans le cas du sinus cardinal (arcsinC est la fonction réciproque de sinC), nous avons :

$$k_{h1} = \frac{2 \arcsinC(10^{-3/20})}{\pi} \quad (2.210)$$

Nous pouvons obtenir la formulation exacte de $A_a(\delta_d)$, mais $A_d(\delta_d)$ reste non intégrable. Le calcul complet est proposé en annexe (cf. paragraphe 5.3.2) :

$$A_a(\delta_d) = \frac{\Delta_a}{k_h} \delta_d \quad (2.211)$$

Pour évaluer $A_d(\delta_d)$, nous effectuons l'approximation grossière suivante :

$$\text{sinCint}(u) = \begin{cases} -\pi/2 & \text{si } u < -\pi/2 \\ +\pi/2 & \text{si } u > +\pi/2 \\ u & \text{si } -\pi/2 \leq u \leq +\pi/2 \end{cases} \quad (2.212)$$

Cela est équivalent à négliger les lobes secondaires du sinus cardinal et à représenter son lobe principal par une « fonction porte à bord doux ». Nous obtenons alors :

$$A_d(\delta_d) \approx \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 e^{j \frac{4\pi}{\lambda} y_0} \sin\left(\frac{2\pi\Delta_d}{\lambda k_h} \right) \sin\left(\frac{2\pi\delta_d}{\lambda} \right) \quad (2.213)$$

soit finalement :

$$E[\underline{E}_N] \approx E[a_k] N \frac{\Delta_a}{k_h \delta_d} \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 e^{j \frac{4\pi}{\lambda} y_0} \sin\left(\frac{2\pi\Delta_d}{\lambda k_h} \right) \sin\left(\frac{2\pi\delta_d}{\lambda} \right) \quad (2.214)$$

2.3.2.3. Espérance mathématique du champ complexe modélisé

Contrairement au modèle de Goodman (2.202), les espérances des parties réelle X et imaginaire Y du champ complexe sont non nulles :

$$E[\underline{E}_N] = E[X + jY] = m_X + j m_Y = a \cos \varphi + j a \sin \varphi \quad (2.215)$$

Grâce aux fonctions partie entière (Ent) et partie fractionnaire (Frac), nous pouvons tirer de l'expression (2.214) :

$$a \approx N \frac{\Delta_a}{k_h \delta_d} \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 E[a_k] \left| \sin\left(\frac{2\pi\Delta_d}{k_h \lambda} \right) \sin\left(\frac{2\pi\delta_d}{\lambda} \right) \right| \quad (2.216)$$

$$\begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi\Delta_d}{k_h \lambda} \right) \sin\left(\frac{2\pi\delta_d}{\lambda} \right) \geq 0 \Rightarrow \varphi \approx \frac{4\pi y_0}{\lambda} \\ \sin\left(\frac{2\pi\Delta_d}{k_h \lambda} \right) \sin\left(\frac{2\pi\delta_d}{\lambda} \right) < 0 \Rightarrow \varphi \approx \frac{4\pi y_0}{\lambda} + \pi \end{cases} \quad (2.217)$$

2.3.2.4. Matrice de covariance des variables aléatoires

Ce travail, réalisé par Loïc Soucille [Petit 2001b], aboutit à une formulation plus complexe de la matrice de covariance que dans le modèle classique de Goodman. Nous pouvons cependant exprimer la loi conjointe des variables aléatoires A et ϕ (amplitude et phase) en fonction des variances σ_X et σ_Y et du coefficient de corrélation ρ entre X et Y :

$$f(A, \phi) = \frac{A}{2\pi\sigma_X\sigma_Y\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left\{ \frac{-1}{1-\rho^2} \left[\left(\frac{A \cos \phi - m_X}{\sigma_X} \right)^2 + \left(\frac{A \sin \phi - m_Y}{\sigma_Y} \right)^2 - 2\rho \frac{(A \cos \phi - m_X)(A \sin \phi - m_Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \right] \right\} \quad (2.218)$$

Les lois marginales de l'amplitude et de la phase se déduisent théoriquement de cette expression, mais leur expression analytique n'est pas aisée.

2.3.2.5. Phase du champ complexe moyen

Bien que le comportement de la phase moyenne ne soit pas *a priori* identique à celui de la phase du champ complexe moyen, nous allons nous affranchir du difficile calcul des lois marginales, en étudiant le comportement du champ complexe moyen.

Nous avons pu calculer la phase du champ complexe moyen, et nous supposons que celle-ci correspond sensiblement à la phase la plus probable. Cette phase est donc liée à la distance du capteur mais aussi, comme nous pouvions nous en douter, au rapport entre la résolution ou le pas de pixel et la longueur d'onde.

Cette phase sera d'autant plus probable que l'amplitude du vecteur moyen est grande. La phase sera donc d'autant plus déterministe que nous approcherons des conditions :

$$\frac{2\pi\Delta_d}{k_h\lambda} = 0 [\pi] \Leftrightarrow \text{Frac}\left[\frac{\Delta_d}{k_h\lambda}\right] \in \left\{0; \frac{1}{2}\right\} \quad (2.219)$$

$$\frac{2\pi\delta_d}{\lambda} = 0 [\pi] \Leftrightarrow \text{Frac}\left[\frac{\delta_d}{\lambda}\right] \in \left\{0; \frac{1}{2}\right\} \quad (2.220)$$

En revanche, le comportement stochastique sera dominant lorsque :

$$\frac{2\pi\Delta_d}{k_h\lambda} = \frac{\pi}{2} [\pi] \Leftrightarrow \text{Frac}\left[\frac{\Delta_d}{k_h\lambda}\right] \in \left\{\frac{1}{4}; \frac{3}{4}\right\} \quad (2.221)$$

$$\frac{2\pi\delta_d}{\lambda} = \frac{\pi}{2} [\pi] \Leftrightarrow \text{Frac}\left[\frac{\delta_d}{\lambda}\right] \in \left\{\frac{1}{4}; \frac{3}{4}\right\} \quad (2.222)$$

Selon ce modèle, il s'avère que pour certaines résolutions et pas de pixel en distance, la phase est naturellement spatialement corrélée et produit des franges en distance selon le motif de la relation (2.217). Ce modèle peut donc éventuellement expliquer la corrélation spatiale de la phase observée parfois, sur les images réelles, pour certaines surfaces. Cependant, il faut noter que le motif produit est difficilement prévisible d'après cette théorie car :

- L'usage de la relation (2.217) nécessite une mesure très précise (inférieure à la longueur d'onde) du pas de pixel et de la résolution.
- En outre, les traitements de synthèse (en particulier pour les systèmes radar aéroportés) modifient le signal de phase de manière difficilement prédictible.

En pratique, ce modèle ne peut donc être employé pour prédire la phase. En revanche, il justifie une corrélation spatiale de la phase et pourrait être employé pour calibrer un système. En effet, si une surface vérifiant les hypothèses nécessaires à la validité de ce modèle de Goodman étendu est disponible (par exemple une surface homogène, isotrope et faiblement rugueuse), nous pouvons envisager d'effectuer des mesures fines de résolutions ou de pas de pixels à partir des mesures du modèle.

2.3.2.6. Notes sur l'approximation de sinCint

Nous avons approximé la fonction sinCint par une décomposition linéaire dans le calcul (2.206) de A_d . La figure **Error! Reference source not found.** représente des primitives de la fonction sinus cardinal éventuellement pondérée (dans le domaine fréquentiel), ainsi que l'approximation que nous en avons faite. Nous pouvons noter que lorsque le signal est pondéré par une fonction de Hanning ou de Hamming, les fonctions H_2 et H_3 (primitives des

fonctions h_2 et h_3 définies dans le tableau 2-1) sont proches de l'approximation H_0 (primitive de la fonction porte).

Cependant, la vraie résolution associée à cette fonction approchée n'est plus celle associée au sinus cardinal (cf. tableau 2-1). Elle est plus grande que la résolution théorique, à laquelle nous devons donc substituer :

$$\Delta_{d,\text{pratique}} = \frac{k_{h_0}}{k_h} \Delta_{d,\text{théorique}} \quad (2.223)$$

où k_{h_0} est égal à 1.

fonction de pondération		réponse impulsionnelle	k_h	
sinus cardinal	---	porte	k_{h_0}	1
porte	---	sinus cardinal	k_{h_1}	0,884487
Hanning	---	sinus cardinal avec lobes secondaires réduits	k_{h_2}	1,43820
Hamming	---	sinus cardinal avec lobes secondaires réduits	k_{h_3}	1,300816

TABLEAU 2-3. Rappel des valeurs de k_h selon la pondération (cf. tableau 2-1).

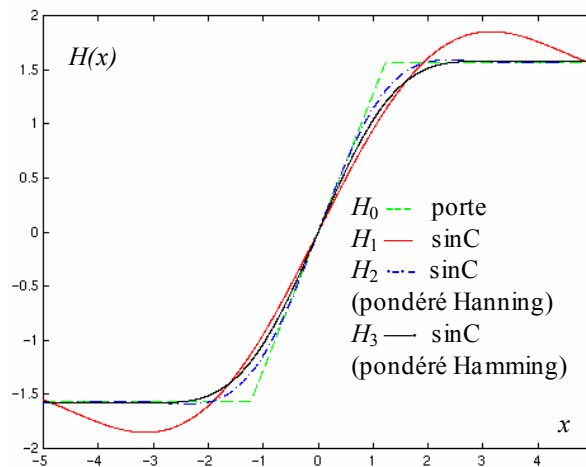


FIGURE 2-21. Fonction H obtenue selon la pondération spectrale de la réponse impulsionnelle.

2.3.3. Simulations

2.3.3.1. Conditions de simulation

Lors des simulations, de nombreux paramètres entrent en ligne de compte :

- le type de réponse impulsionnelle,
- la densité de cibles,
- la répartition des cibles,
- le rapport entre pas de pixel et longueur d'onde, avec une différence de comportement selon que nous considérons la partie entière du rapport ou sa partie fractionnaire,

- le rapport entre résolution et longueur d'onde, avec une différence de comportement selon que nous considérons la partie entière du rapport ou sa partie fractionnaire.

En outre, lors des simulations, la distance maximale de prise en compte des lobes secondaires joue un rôle plus ou moins important, selon le type de réponse impulsionnelle. Un compromis a dû être réalisé entre temps de calcul et précision. Nous avons limité la précision du calcul intégral, notamment en limitant la portée des lobes secondaires lors de la prise en compte des pixels du voisinage (de taille $(2n+1) \times (2n+1)$). Des effets indésirables avaient ainsi affecté nos premières mesures [Petit 2001b]. Les mesures présentées ici [Petit 2001a] ont été validées par des simulations plus fines.

Les calculs de corrélation s'effectuent sur 500 échantillons. Chaque échantillon est totalement indépendant des autres, c'est-à-dire que la corrélation induite par la réponse impulsionnelle des pixels proches est ignorée (cf. paragraphe 2.2.1.2). Nous mesurons donc seulement l'effet déterministe de la phase.

Nous étudierons l'incidence de la partie entière du rapport entre le pas de pixel et la longueur d'onde (que nous appelons facteur d'échelle) selon la densité de cibles. Les parties fractionnaires des rapports entre résolution et longueur d'onde (à k_h près) et pas de pixel et longueur d'onde, sont choisies de façon à nous placer dans un contexte favorable de corrélation de la phase.

Deux types de distributions ont été étudiées : le cas de la distribution spatiale aléatoire et le cas de la distribution spatiale avec motif périodique.

Distribution aléatoire de cibles

Pour la distribution aléatoire, une densité N de 1000 cibles pour une surface de taille $\lambda \times \lambda$ a été choisie. Le problème a été abordé d'un point de vue unidimensionnel afin de réduire le temps de calcul. Lors des simulations précédentes, nous avons employé des densités de cibles plus faibles et avons obtenu des corrélations plus fortes. Cependant, des approximations avaient été faites sur les simulations, qui semblent avoir conduit à des résultats erronés.

Motif périodique

L'idée principale est que certaines surfaces anthropiques peuvent contenir un motif périodique de rugosité ou de forme, avec une période λ . Nous employons une densité de cibles égale à une pour une surface de taille $\lambda \times \lambda$ (cf. figure 2-22), tirée selon une densité de probabilité de présence gaussienne d'écart-type σ , centrée autour de la position de chaque occurrence du motif. Le motif est donc résonant avec la longueur d'onde. L'écart-type σ de la densité de probabilité est proportionnel aux pas d'échantillonnage de l'image (le problème est abordé d'un point de vue bidimensionnel) :

$$\sigma = \sigma_0 \delta_a \delta_d \quad (2.224)$$

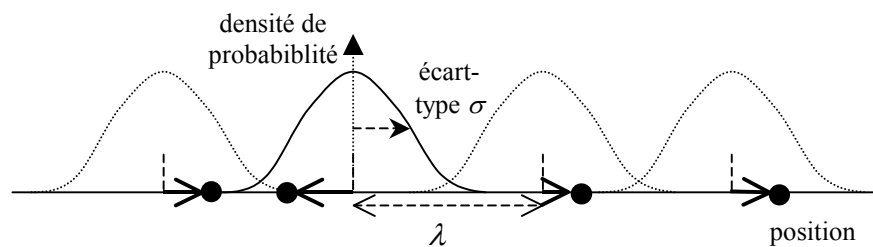


FIGURE 2-22. Exemple de motif périodique.

2.3.3.2. Modèle théorique

Les simulations obtenues pour le modèle théorique (cas de la distribution spatiale aléatoire) montrent les modulations attendues de la corrélation de la phase (*cf.* figure 2-23). Cependant elle décroît plus vite que ce que nous avons observé lors des premières simulations [Petit 2001b], lorsque le rapport entre pas d'échantillonnage δ et longueur d'onde λ augmente. La réponse impulsionnelle choisie est ici du type « sinus cardinal sans pondération spectrale ». La contribution des lobes secondaires est donc importante.

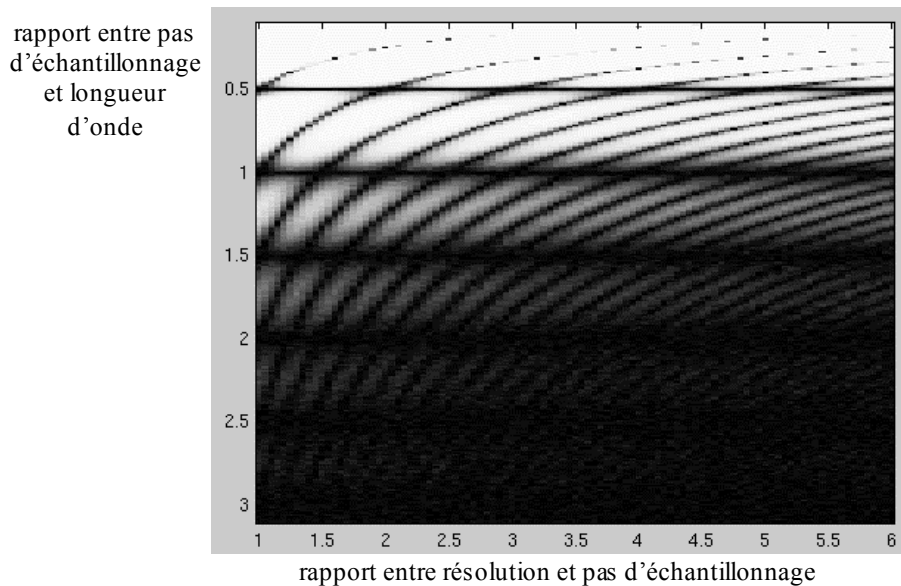


FIGURE 2-23. Représentation en niveaux de gris des modulations de la corrélation de la phase dans le cas du modèle théorique de Goodman étendu. Ces variations sont étudiées en fonction des rapports entre pas de pixel et longueur d'onde et entre pas de pixel et résolution.

Les fortes décroissances de la corrélation spatiale de la phase observées sur les figures 2-24-a et 2-24-b suggèrent qu'avec cette réponse impulsionnelle, seule une forte densité spatiale de cibles permet de produire une corrélation de la phase élevée. Dans ce cas, la distribution spatiale tend vers l'uniformité. Cela suggère que seule une surface avec une faible rugosité pourrait produire une telle corrélation de la phase.

C'est pourquoi je me suis intéressé au cas particulier d'une distribution spatiale de cibles présentant une périodicité. La densité de cibles est faible (une seule pour une surface de taille $\lambda \times \lambda$) et un faible écart-type est nécessaire pour obtenir une forte corrélation de la phase.

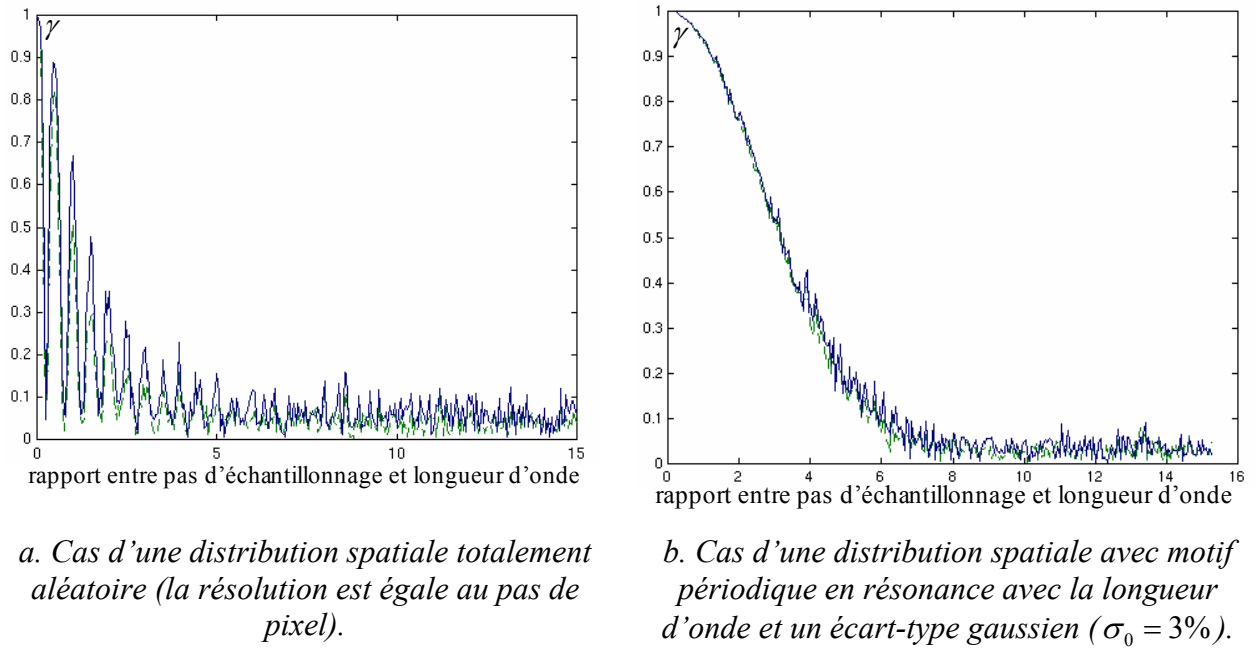


FIGURE 2-24. Corrélation de la phase pour le modèle théorique. Les estimateurs γ_Φ et γ_A sont représentés respectivement par la courbe bleue continue et la courbe verte discontinue.

2.3.3.3. Rôle de la réponse impulsionnelle

Pour le calcul de l'intégrale en distance, nous avons dû approcher la réponse impulsionnelle par une fonction porte. Nous savons que les données ont été filtrées en fréquence par une fonction de Hamming ou de Hanning. Nous avons pu constater, au cours du travail effectué par Loïc Soucille et au cours de mon propre travail de thèse, que la réponse impulsionnelle jouait un rôle très important sur la corrélation spatiale de la phase, outre le fait qu'elle corrèle naturellement les pixels voisins entre eux. Ainsi, une réponse impulsionnelle étendue spatialement a tendance à réduire l'impact de la composante déterministe de la phase induite par le modèle.

Avec des données pondérées en fréquence par un filtre de Hamming, la corrélation devient rapidement négligeable, quels que soient la résolution et le pas de pixel (*cf.* figure 2-25-a). Ce résultat est assez inattendu, compte tenu de la forte corrélation de la phase qui avait été observée avec des réponses impulsionnelles du type « fonction de Dirac » et « fonction porte ». Il tire son explication de la forme de la réponse impulsionnelle.

Les réponses des cibles interfèrent de telle sorte que l'amplitude du signal renvoyé est plus faible que dans le cas théorique. En effet, la contribution des cibles présentes dans les pixels voisins du pixel étudié est réduite par la décroissance de l'amplitude des lobes latéraux lorsque nous nous éloignons de ce pixel. Cependant, leur contribution reste forte, car le nombre de cibles qui y contribuent croît proportionnellement à cette distance. Ces contributions parasites font accroître la part aléatoire du signal, surtout du point de vue de la phase. Cette supposition nécessiterait une validation mais semble *a priori* fort plausible.

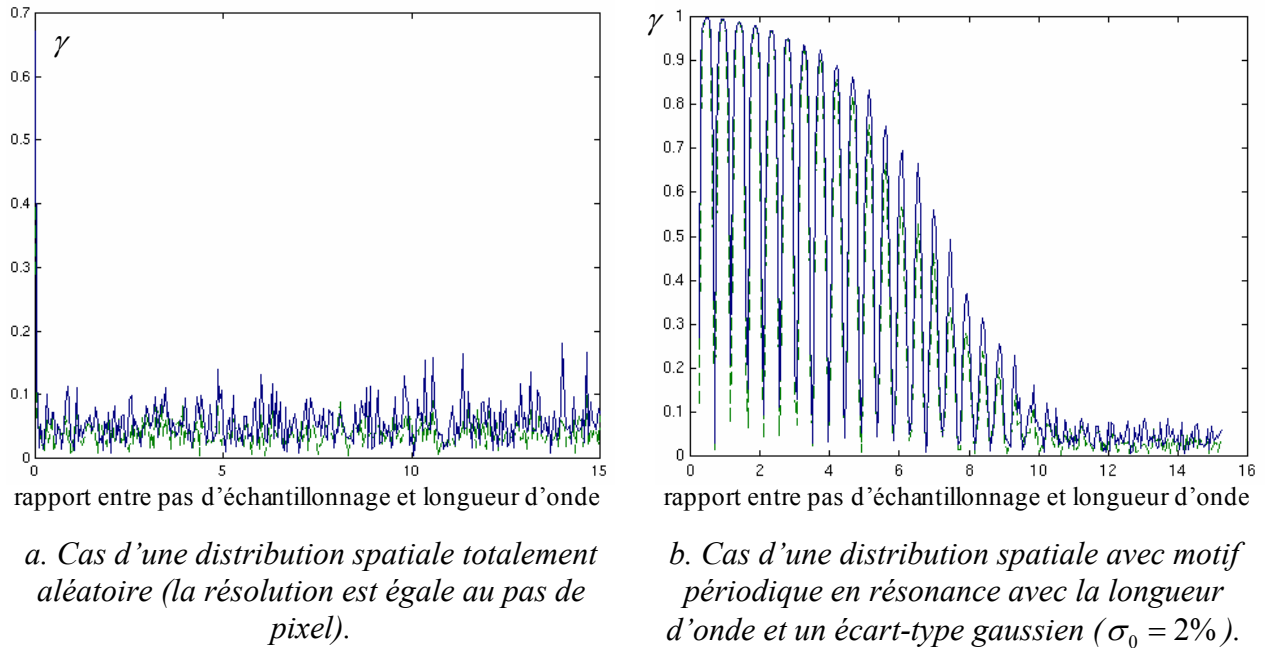


FIGURE 2-25. Corrélation de la phase dans le cas où la réponse impulsionnelle est pondérée spectralement par une fonction de Hamming. Les estimateurs γ_Φ et γ_A sont représentés respectivement par la courbe bleue continue et la courbe verte discontinue.

En revanche, même avec un sinus cardinal « pondéré Hamming » (en fréquence), la corrélation reste élevée avec le modèle présentant un motif périodique (cf. figure 2-25-b). Un écart-type plus faible ($\sigma_0 = 2\%$) a cependant été employé dans la simulation présentée, ce qui a eu pour effet de produire une nouvelle modulation inexpliquée.

2.4 Conclusions

Nous avons montré que la phase radar peut être spatialement cohérente dans le cadre de l'imagerie ROS haute résolution. Trois cas sont représentatifs : les objets brillants, les artéfacts de synthèse ROS et des objets présentant une rugosité particulière (faible ou périodique).

Les artéfacts de synthèse ne pouvant être aisément détectés, la corrélation spatiale de la phase peut contribuer à leur détection et leur élimination. D'une manière générale, les zones présentant une forte corrélation spatiale de la phase doivent être traitées avec précaution dans un processus interférométrique. Cela peut signifier que la phase est inutilisable car elle est le produit d'un processus parasite ou qu'elle est la signature d'un objet présentant une forme ou une rugosité particulière. Dans le second cas, la phase est au contraire porteuse d'une information précise car partiellement redondante. En effet, il apparaît alors possible de déduire la phase d'un pixel de celle de ses voisins et nous disposons alors de plusieurs échantillons pour estimer une phase.

Nous avons en outre défini une extension du modèle de Goodman qui contribue à mieux décrire le comportement de la phase.

La mesure de la corrélation spatiale de la phase contribue donc à l'amélioration de la qualité interférométrique en haute résolution, mais aussi à la caractérisation de certains objets de la scène. Ces sujets méritent cependant d'être approfondis.

3. Traitement des repliements pour la reconstruction du « 3D »

Jusqu'à présent, nous avons considéré des surfaces de pentes suffisamment faibles pour ne pas nous écartier du domaine de validité des postulats interférométriques. Cependant, en haute résolution, et en particulier en milieu urbain, il est courant de rencontrer des surfaces verticales. Ces surfaces sont donc en repliement, dans la géométrie radar (cf. paragraphe 1.1.3.1). Ces surfaces constituent un des écueils majeurs d'une reconstruction « 3D ». Dans ce chapitre, nous abordons le problème de la modélisation du signal dans les zones de repliement et présentons ensuite une méthode de détection de ces zones. Nous proposons ensuite un algorithme de reconstruction du « 3D » exploitant le signal d'une zone de repliement.

3.1 Filtrage de pente

3.1.1. Cohérence interférométrique dans les zones de repliement

3.1.1.1. Estimation de la cohérence

Définition théorique et définition pratique

La cohérence interférométrique définie par l'expression suivante est un outil courant de l'estimation de la qualité interférométrique :

$$\gamma = \frac{|E[z_2 z_1^*]|}{\sqrt{E[z_1 z_1^*] E[z_2 z_2^*]}} \quad (3.225)$$

Son utilisation est un peu délicate, puisqu'en pratique, il est nécessaire de recourir à des hypothèses de stationnarité et d'ergodicité (cf. paragraphe 1.2.2.4) pour définir un estimateur local :

$$\tilde{\gamma} = \frac{|\langle z_2 z_1^* \rangle|}{\sqrt{\langle z_1 z_1^* \rangle \langle z_2 z_2^* \rangle}} \quad (3.226)$$

Cependant, comme le souligne Touzi :

- Pour de petites surfaces, cet estimateur est biaisé [Touzi 1996, Touzi 1999].
- Pour de grandes surfaces, les hypothèses de stationnarité ne sont pas toujours vérifiées [Touzi 1998, Touzi 1999].

Il est donc nécessaire d'employer un estimateur corrigé des effets non stationnaires [Monti Guarnieri 1997, Touzi 1999]. Les non stationnarités sont représentées par un modèle Φ des variations de la phase, comme lors de la définition de la corrélation spatiale de la phase (cf. paragraphe 2.2.1.1). Cette contribution à la valeur de la phase est soustraite, afin de ne conserver que la composante supposée stationnaire :

$$\tilde{\gamma} = \frac{\left\langle \underline{z}_1 \underline{z}_2^* \exp(-j\Phi) \right\rangle}{\sqrt{\left\langle \underline{z}_1 \underline{z}_1^* \right\rangle \left\langle \underline{z}_2 \underline{z}_2^* \right\rangle}} \quad (3.227)$$

Mesures de la cohérence

Pour une estimation locale de la cohérence, nous pouvons employer un modèle simple de la phase fondé sur la moyenne locale du gradient [Petit 1999] :

$$\Phi_{\text{gradient}}(u, v) = \left\langle \nabla \text{Arg} \left(\frac{\underline{z}_1 \underline{z}_2^*}{\sqrt{\underline{z}_1 \underline{z}_1^* \underline{z}_2 \underline{z}_2^*}} \right) \right\rangle \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3.228)$$

La prise en compte d'un modèle de franges dans le calcul de la cohérence est primordial pour la pertinence du calcul, comme le soulignent des simulations réalisées avec 2SIR [Petit 1999] et dont nous rappelons les résultats ci-après.

Nous considérons, dans un premier temps, la mesure de la cohérence sur un sol plan dont la pente varie (cf. figure 3-1). Des couples d'images interférométriques ont été produits pour un angle local d'incidence θ' (l'angle d'incidence θ par rapport au sol plat est le même pour toutes les simulations, seule la pente du sol α_q varie) et une ligne de base orthogonale b_{ortho} variables. La cohérence a été estimée selon deux modèles de franges : celui fondé sur la formulation théorique des franges orbitales (cf. paragraphe 1.2.3.2) et celui fondé sur la mesure du gradient local (après soustraction des franges orbitales). Le modèle de franges fondé sur le gradient local est estimé sur une fenêtre rectangulaire (cf. tableau 3-1).

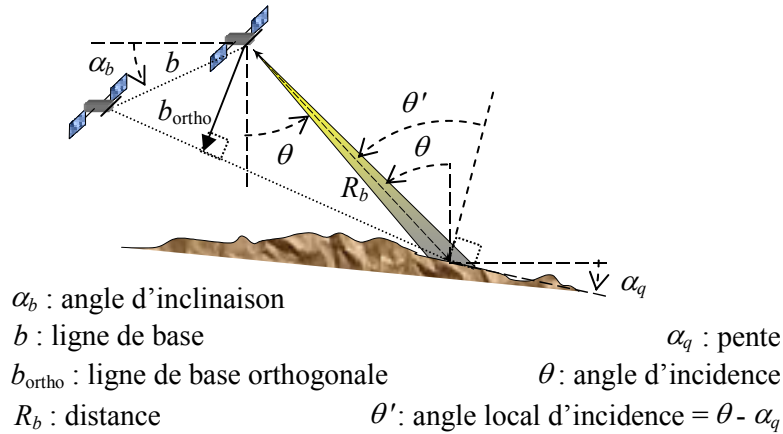


FIGURE 3-1. Géométrie d'acquisition des simulations réalisées avec 2SIR pour étudier les variations de la cohérence en fonction de l'angle d'incidence et de la pente du sol.

Nous nous plaçons ici dans un contexte de très basse résolution, puisque les paramètres de simulation ont été choisis pour correspondre à ceux du satellite ERS qui observerait un sol rocheux plan (assimilable à une facette plane).

nom du paramètre	notation	valeur	unité
longueur d'onde (bande C)	λ	0,056	mètres
polarisation	sans objet	VV	sans objet
type de matériau	sans objet	sol rocheux	sans objet
pas en distance	δ_d	7,9	mètres
pas en azimut	δ_a	3,9	mètres
taille de la fenêtre d'estimation en distance	sans objet	4	pixels
taille de la fenêtre d'estimation en azimut	sans objet	100 ²⁴	pixels
distance moyenne de la facette	R_b	850 000	mètres
angle d'incidence	θ	23	degrés
angle d'inclinaison	α_b	0	degrés

TABLEAU 3-1. Paramètres de simulation pour les mesures de cohérence.

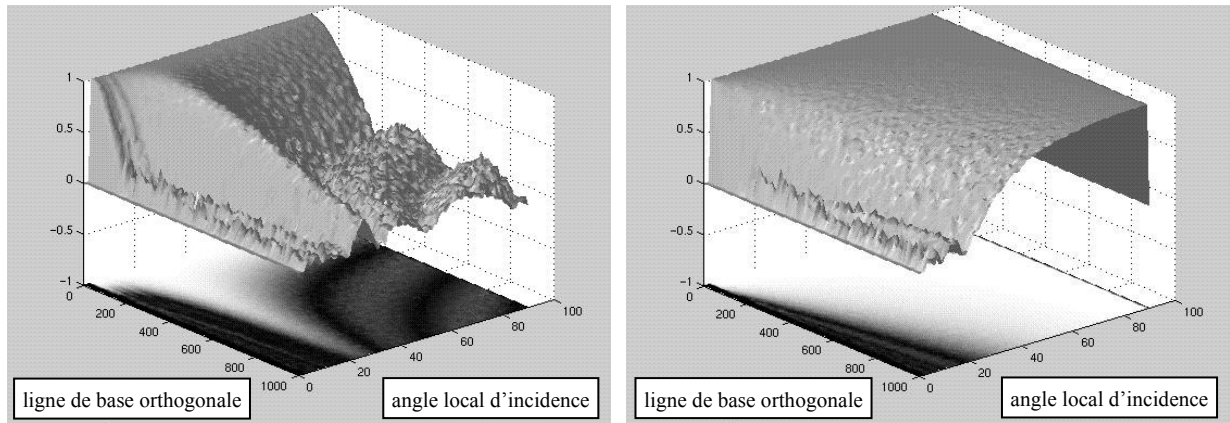
Les simulations ont été générées pour 100 valeurs de l'angle local d'incidence θ' et pour 100 valeurs de la ligne de base orthogonale b_{ortho} . J'ai donc produit $2 \times 100 \times 100$ images. Les franges interférométriques sont des franges orbitales et des franges produites par le relief (cf. équation (1.154)). Nous soustrayons les franges orbitales (pour un angle d'incidence de 23 degrés), d'après la formule (1.157) :

$$\Phi_{\text{orbital}}(u, v) \approx \frac{4\pi b}{k_{\text{st}} \lambda} \frac{\cos(\theta - \alpha_b)}{R_{b1} \tan(\theta)} (DP + \delta_d v) \quad (3.229)$$

La cohérence mesurée est représentée sur les graphiques de la figure 3-2 en niveaux de gris (le noir correspond à une cohérence nulle, le blanc à une cohérence maximale, c'est-à-dire égale à 1) en fonction des deux paramètres (angle local d'incidence et ligne de base orthogonale). Une représentation tridimensionnelle a été rajoutée, de façon à visualiser plus finement les petites variations de la cohérence. La cohérence est calculée une fois les franges orbitales soustraites et également, pour la figure 3-2-b, après correction d'un gradient local moyen (donc en tenant compte des franges induites par le relief).

Nous devons noter, premièrement, que lorsque l'angle local d'incidence est proche de 0 ou de 90 degrés, les simulations peuvent être corrompues. Ainsi, les petites oscillations de cohérence observées sur les graphiques, dans les cas limites de l'angle local d'incidence (en particulier au voisinage de 0 degré), ne sont pas significatives. Lorsque l'angle local d'incidence s'écarte de 23 degrés, la surface n'est plus horizontale et la pente augmente (en valeur absolue). Nous remarquons alors que, conformément à la théorie (cf. paragraphe 1.2.3.2), la cohérence décroît lorsque la pente augmente ou lorsque la ligne de base croît (cf. figure 3-2-a). Cependant, si la cohérence est calculée en tenant compte des franges locales induites par le relief (cf. figure 3-2-b), celle-ci est plus élevée puisqu'elle reste proche de 1 pour presque toutes les incidences et lignes de base. Cela signifie que la perte de cohérence induite par les décalages spectraux des signaux est moindre que celle induite par la non prise en compte des non stationnarités. Ces résultats ont déjà été soulignés par Touzi [Touzi 1999].

²⁴ Le signal est stationnaire en azimut mais pas en distance. Nous pouvons donc nous permettre d'estimer la cohérence sur un grand nombre d'échantillons (pixels) en azimut.



a. Cohérence mesurée en tenant compte uniquement des franges orbitales.

b. Cohérence mesurée en tenant compte des franges orbitales et du gradient moyen local.

FIGURE 3-2. Variations de la cohérence mesurée sur des simulations, en fonction de l'angle local d'incidence et de la ligne de base orthogonale.

En outre, nous pouvons remarquer des modulations de la cohérence (cf. figure 3-2-a) en fonction de l'angle local d'incidence ou de la ligne de base orthogonale. Ce phénomène apparaît en raison de résonances entre la fréquence des franges résiduelles et le motif de la fenêtre d'estimation. Lorsque la phase interférométrique des franges résiduelles effectue exactement un nombre entier de tours sur la fenêtre d'estimation, le signal interférométrique moyen $\langle \underline{z}_2 \underline{z}_1^* \rangle$ (évalué sur la fenêtre) est nul ou proche de zéro et la cohérence est également minimale. En revanche, lorsque la phase interférométrique effectue un nombre entier et demi de tours, le signal interférométrique moyen est non nul et la cohérence peut être un peu plus élevée.

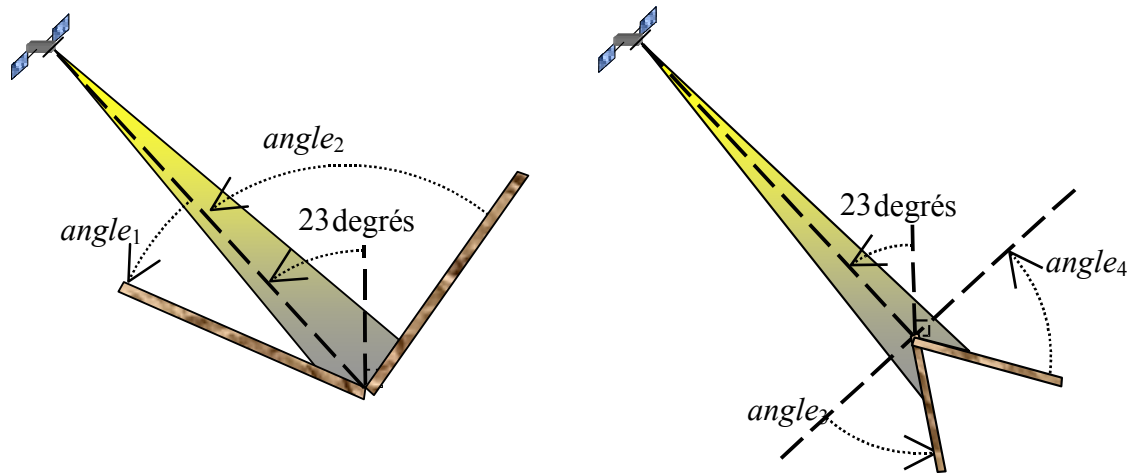
Ces résultats soulignent bien les rôles essentiels, dans l'estimation de la cohérence interférométrique :

- du modèle de franges employé pour modéliser le comportement déterministe de la phase ;
- de la forme et taille de la fenêtre d'estimation dans le cas où des franges résiduelles subsistent.

3.1.1.2. Comportement de la cohérence dans la zone de repliement

Modélisation du signal de la zone de repliement

Je m'intéresse maintenant au cas, non encore étudié, de la zone de repliement. J'emploie encore les paramètres de basse résolution du satellite ERS. Nous pouvons considérer deux cas différents de repliement que nous appelons respectivement « repliement positif » et « repliement négatif » (cf. figure 3-3). La ligne de base orthogonale est une constante de 250 mètres. Je fais varier les deux angles définissant le repliement de 0 à 90 degrés.



a. Cas du repliement dit « positif ».

b. Cas du repliement dit « négatif ».

FIGURE 3-3. Géométries du repliement pour l'étude de la variation de la cohérence.

Dans le cas du repliement positif, des phénomènes de double et triple rebonds sont susceptibles d'apparaître, cependant nous ne prendrons pas en compte ces effets ici car ils sont négligeables sur les surfaces naturelles, qui sont trop rugueuses pour produire des phénomènes cohérents.

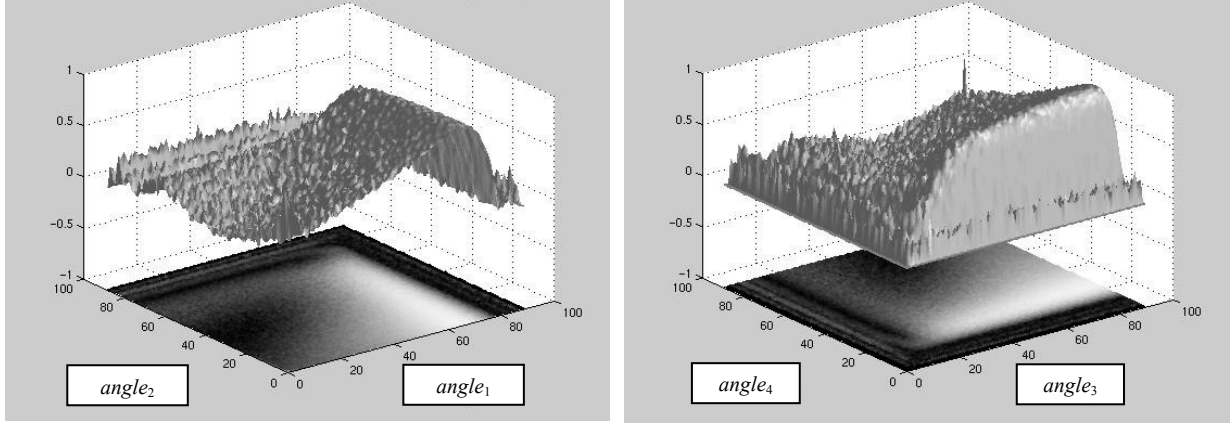
Le repliement négatif peut se rencontrer sur des sommets de montagnes, collines ou buildings. Il apparaît difficile de rencontrer de tels cas sans repliement positif, sauf si la surface qui est en repliement positif est masquée et donc n'est pas éclairée par le radar. Cependant, il apparaît intéressant de dissocier ces deux phénomènes.

Compte tenu du fait que les signaux provenant des deux plans sont superposés dans la zone de repliement, la notion de franges est inappropriée. En effet, les signaux complexes dont les motifs de franges pourraient être associés à chacun des plans sont maintenant additionnés de manière cohérente. Les fréquences et amplitudes de ces signaux étant différentes, le signal complexe présente des modulations d'amplitude et de fréquence différentes d'un simple motif de franges. Il n'est donc pas possible et pertinent de mesurer un modèle de franges sur l'image. Seules les franges orbitales peuvent être soustraites pour le calcul de la cohérence, puisqu'elles proviennent d'un modèle théorique.

Analyse de la cohérence dans la zone de repliement

Nous observons sur les figures 3-4-a,b que la cohérence est maximale lorsqu'une des deux facettes est horizontale ($angle_1 = 90 - 23 \text{ deg}$ pour le cas a ; $angle_4 = 23 \text{ deg}$ pour le cas b) et l'autre est parallèle à la direction d'incidence ($angle_2 = 0 \text{ deg}$ pour le cas a ; $angle_3 = 90 \text{ deg}$ pour le cas b). En effet, dans ce cas, le signal renvoyé par la facette parallèle à la direction d'incidence est très faible, tandis que la contribution de celle qui est horizontale est importante et en parfait accord avec le modèle de franges orbitales soustraites.

En revanche, lorsque la normale d'une des facettes est proche de la direction d'incidence, sa contribution est forte et la cohérence chute car le décalage spectral est maximal (cf. paragraphe 1.2.3.2). Comme précédemment, nous pouvons en outre observer des fluctuations de cohérence dont l'explication peut être tirée de résonances entre le motif de franges induit par le décalage spectral et le motif de la fenêtre d'estimation.



a. Cas du repliement positif.

b. Cas du repliement négatif.

FIGURE 3-4. Évolution de la cohérence selon les paramètres du repliement.

3.1.2. Optimisation de la technique interférométrique pour une pente connue

3.1.2.1. Sélection de pente

Oublions un instant le problème du repliement et considérons une surface de pente uniforme. Nous savons que la qualité d'un interférogramme est entachée d'un écart au postulat 4, induit par le décalage spectral de la réponse de la surface en mode « stéréoscopique ». Cependant, il est possible d'obtenir un interférogramme de qualité améliorée si une estimation suffisamment précise de la pente est disponible.

La technique consiste à sélectionner les bandes spectrales communes aux deux images sources (compte tenu de l'angle d'incidence et de la pente du sol : cf. paragraphe 1.2.3.2) et à produire deux nouvelles images filtrées. L'interférogramme généré à partir de celles-ci contiendra un bruit de phase résiduel, lié à une erreur éventuelle sur l'estimation initiale de la pente, moindre que le bruit initial.

La figure 3-5 présente ce principe de façon générale. Les signaux ont une bande passante de largeur B , et nous sélectionnons des bandes spectrales de largeur B_s , décalées de Δf . Dans le cas de la « sélection de pente simple », nous avons la relation :

$$B_{s,\text{simple}} = B - |\Delta f| \quad (3.230)$$

La figure 3-5 présente un traitement où la largeur B_s est beaucoup plus petite que $B_{s,\text{simple}}$. Nous pouvons, en effet, envisager de sélectionner des portions de spectre plus petites que $B_{s,\text{simple}}$, dans le but de produire plusieurs paires de sous-vues. C'est le principe de ce que nous appelons « l'interférométrie de pente ».

Cependant, nous choisissons forcément :

$$B_s \leq B_{s,\text{simple}} = B - |\Delta f| \quad (3.231)$$

car le fait de sélectionner une portion plus large de spectre n'apporte aucune information supplémentaire vis-à-vis de l'interférométrie. En effet, les portions de spectre ajoutées sont totalement disjointes et incohérentes. Elles contribuent seulement à ajouter du bruit, même si elles semblent augmenter, en apparence, la résolution de l'interférogramme.

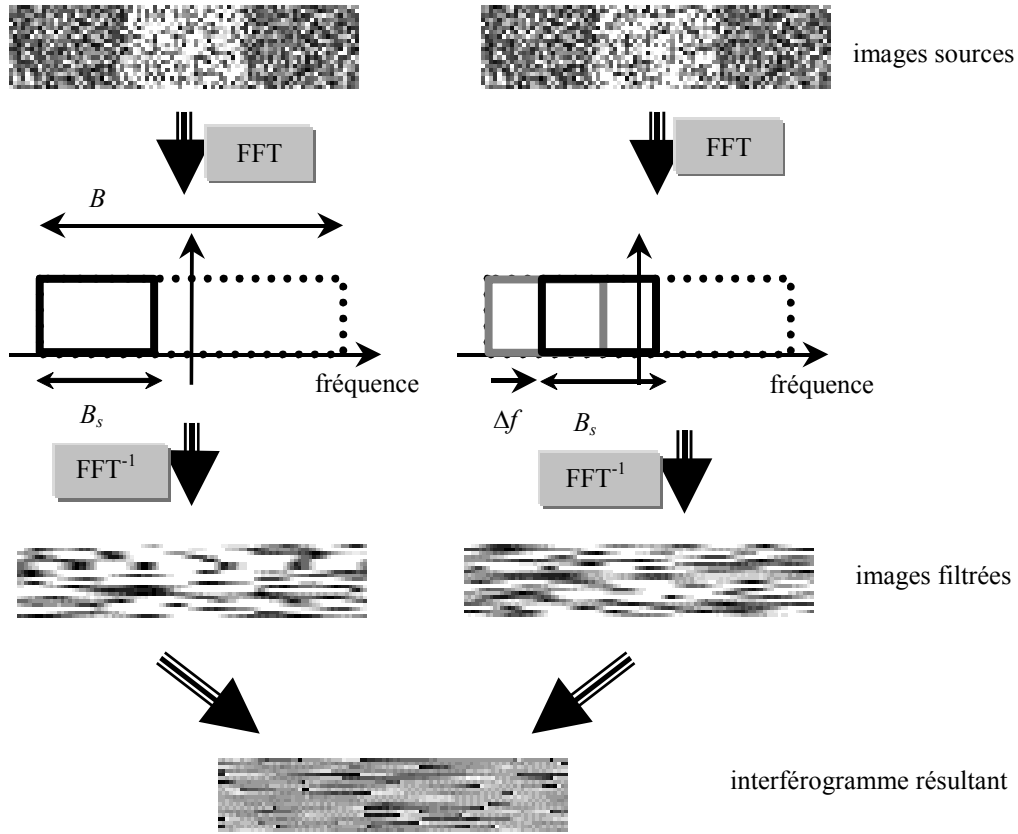


FIGURE 3-5. Filtrage de signaux dont les réponses spectrales sont décalées dans le but de faire de l'interférométrie de pente.

3.1.2.2. Interférométrie de pente

Méthodologie

Pour réaliser un interférogramme de pente, nous génèrons l'ensemble des paires de sous-vues possibles correspondant à une largeur de bande spectrale B_s donnée et à un décalage spectral Δf donné (donc ces sous-vues n'ont pas spécifiquement des spectres disjoints). Pour une image de largeur N_r pixels en distance, le nombre de sous-vues possibles (compte tenu du pas d'échantillonnage en fréquence F_e/N_r) est :

$$nb_{\text{sous-vues}}(B_s) = N_r \frac{B - |\Delta f| - B_s}{F_e} + 1 \quad (3.232)$$

Dans le cas de $B_{s,\text{simple}}$, le nombre de sous-vues disponibles vaut bien 1.

Le procédé interférométrique par sélection de pente réduit d'autant plus la résolution effective des sous-vues que B_s est faible. En appliquant le calcul interférométrique sur les paires de sous-vues, nous obtenons des sous-interférogrammes qui sont donc plus faiblement résolus. En revanche, en sommant les sous-interférogrammes résultants (cf. figure 3-6), il est possible d'accroître la cohérence interférométrique, pour un signal associé à une pente donnée. Le procédé a été présenté [Petit 2000b] dans le cas où $B_s = \Delta f$. J'expose ici le cas où B_s est quelconque [Petit 2001c].

Dans le cas de la figure 3-6, l'absence de franges et de bruit traduit le fait que le décalage spectral sélectionné correspond à la pente du sol. Si le décalage spectral différait un peu de

celui qui correspond à cette pente, il resterait des franges résiduelles. S'il s'agissait d'une zone de repliement ou que la pente du sol n'était pas uniforme et que le décalage spectral sélectionné correspondait à une de ces pentes, l'interférogramme ne présenterait pas de franges mais serait bruité.

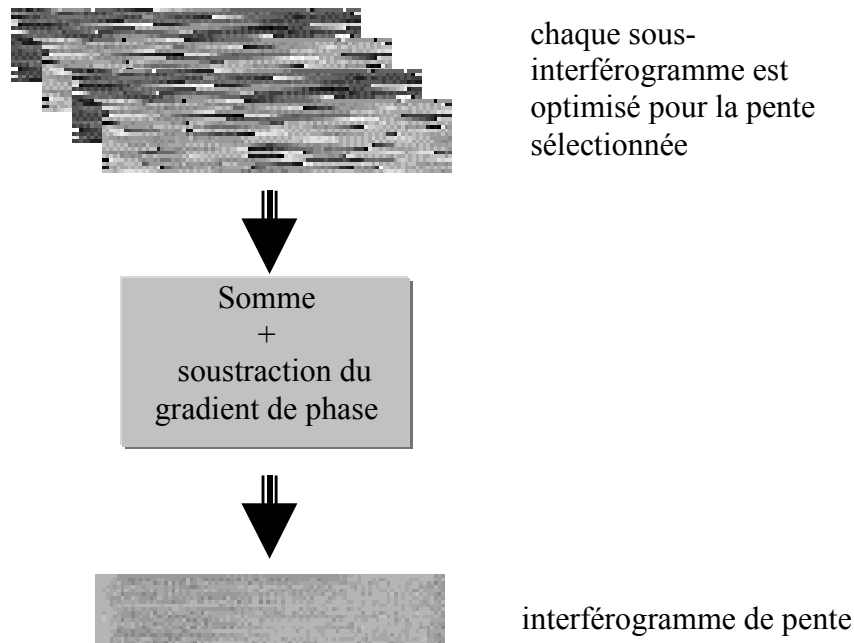


FIGURE 3-6. Génération d'un interférogramme de pente à partir de sous-interférogrammes générés par sélection de pente.

Principe de l'interférométrie de pente

L'intérêt du procédé est de permettre la séparation des différents signaux, correspondant à des pentes différentes, qui sont superposés dans une zone de repliement. Considérons le signal produit par un sol de pente donnée, superposé à deux autres signaux correspondant à des pentes très différentes. La composante du signal interférométrique associée à une surface dont la pente est spécifique au décalage spectral sélectionné a un comportement cohérent dans chaque sous-interférogramme, tandis que les composantes issues des autres signaux de pente auront des comportements proches du bruit. En effet, les réponses spectrales du sol mises en jeu par les bandes sélectionnées sont totalement différentes pour ces signaux. Les signaux interférométriques résultants sont donc imprévisibles et peuvent être considérés, en première approximation, comme des bruits blancs.

La figure 3-7 résume ce processus. Dans cet exemple, chaque sous-interférogramme est la résultante de trois signaux, dont l'un a un comportement cohérent (phase invariante à une composante linéaire et connue près) et les deux autres peuvent être considérés comme un bruit dont l'espace des phases est équiprobable. Si le nombre de sous-vues est suffisant, l'interférogramme final ne doit plus contenir que le signal associé à la pente sélectionnée, plus un bruit résiduel. Nous pouvons donc sélectionner des signaux de pentes spécifiques, et produire des interférogrammes dits « interférogrammes de pente ».

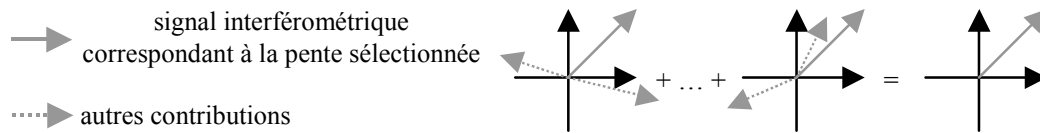


FIGURE 3-7. Sommation de tous les sous-interférogrammes complexes en représentation de Fresnel.

3.1.2.3. Cohérence de pente

Propriétés

De la même manière que nous avons produit des interférogrammes de pente, nous pouvons calculer des images de cohérence pour un décalage spectral donné. Ces « cohérences de pente » sont des indicateurs de la qualité interférométrique. La cohérence sera d'autant plus importante que les paires de bandes spectrales sélectionnées pour générer les paires de sous-vues correspondent mieux à la même réponse spectrale du sol. Nous en déduisons trois propriétés :

1. **Propriété 1.** La cohérence est maximale lorsque le décalage spectral Δf sélectionné correspond à la pente locale du sol.
2. **Propriété 2.** Si plusieurs signaux associés à plusieurs pentes sont superposés, la courbe de la cohérence en fonction du décalage spectral Δf doit présenter plusieurs maxima. Ces maxima sont d'autant plus marqués que les signaux ont pu être mieux séparés par le filtrage. En effet, plus la bande spectrale B_s est étroite, plus le bruit résiduel introduit par les signaux liés aux autres pentes est négligeable. Il faut toutefois garder à l'esprit que la résolution est dégradée d'autant.
3. **Propriété 3.** Si le modèle de franges Φ (employé dans le calcul pratique de la cohérence) est remplacé par une fonction nulle, les pics de la courbe de cohérence observés sont beaucoup plus étroits. En effet, lors du filtrage de pente, le décalage fréquentiel est corrigé, ce qui signifie que si le décalage spectral choisi est en correspondance avec la pente, l'interférogramme résultant n'a plus de franges. En revanche, si cette correspondance n'est pas exacte, il subsiste des franges résiduelles qui font chuter la cohérence.

Ces propriétés vont être vérifiées sur des exemples dans le prochain paragraphe.

Cohérence optimale

Cette méthode permet en outre d'avoir un calcul optimal de la cohérence, comme le laisse pressentir la propriété 3. En effet, puisque l'interférométrie de pente est calculée pour une surface dont la pente est connue et supposée uniforme, les franges attendues peuvent être soustraites sans erreur. Il n'est plus alors nécessaire de recourir à un modèle local de franges pour le calcul de la cohérence, puisque les hypothèses de stationnarité sont vérifiées.

3.2 Séparation des repliements

3.2.1. Détection des repliements

3.2.1.1. Données sources

Pour vérifier les propriétés énoncées dans le paragraphe précédent, nous avons utilisé des simulations produites par 2SIR. Les paramètres de génération correspondent aux conditions spatiales d'un système radar aux performances métriques. La ligne de base b utilisée est grande, ce qui est nécessaire pour obtenir un décalage spectral suffisant, compte tenu de la finesse de la résolution utilisée (cf. paragraphe 1.2.3.2). Avec des systèmes d'acquisition ayant un pouvoir de résolution moindre, comme ERS ou RADARSAT1, des lignes de base de quelques centaines de mètres seraient suffisantes.

nom du paramètre	notation	valeur	unité
longueur d'onde (bande X)	λ	0,031714	mètres
bande spectrale	B	$74,95 \cdot 10^6$	Hertz
polarisation	sans objet	VV	sans objet
type de matériau	sans objet	sol rocheux	sans objet
pas en distance	δ_d	2	mètres
pas en azimuth	δ_a	2	mètres
taille de la fenêtre d'estimation en distance	sans objet	40	pixels
taille de la fenêtre d'estimation en azimuth	sans objet	20	pixels
distance moyenne de la facette	R_b	800 000	mètres
ligne de base	b	2000 ou 3500	mètres
angle d'incidence	θ	35	degrés
angle d'inclinaison	α_b	0	degrés
pente locale	α_q	8,43 ou 75	degrés

TABLEAU 3-2. Paramètres de simulation pour la détection de pente par mesure de la cohérence de pente sur une fenêtre d'estimation.

3.2.1.2. Détection de pente

Détection par analyse de la variation de la cohérence de pente

La propriété 1 peut être utilisée directement pour mesurer la pente grossièrement. La figure 3-8 représente les variations de la cohérence de pente en fonction du décalage spectral Δf , pour deux pentes différentes (8,43 deg et 75 deg, cf. tableau 3-2), et pour une ligne de base égale à 3500 m. Les calculs ont été effectués sur les couples interférométriques de sous-vues de chacune des deux pentes, de manière totalement indépendante. Le décalage spectral est représenté en pourcentage de la bande passante B . La largeur de bande sélectionnée pour le filtrage est $B_{s,\text{simple}}$ (il n'y a pas de sommation de sous-vues). Celle-ci varie donc avec le décalage fréquentiel Δf (cf. équation (3.230)).

Nous observons bien des pics de cohérence pour les décalages spectraux attendus. Ces pics sont étroits, car nous avons choisi, pour le modèle de franges Φ , la fonction nulle (cf. la propriété 3). Cela est satisfaisant, dans notre cas, car nous souhaitons mettre en valeur les maxima de la cohérence, et les dimensions de la fenêtre de calcul (20 pixels en azimuth et 40 pixels en distance) se prêtent à ce traitement. Cependant, avec une fenêtre de taille plus petite, le pas fréquentiel serait augmenté d'autant, et donc la probabilité de passer par un décalage spectral proche de celui recherché serait plus faible. Le maximum de cohérence ne pourrait être aisément détecté. Il est donc préférable d'utiliser le modèle de franges du type gradient (3.228), pour corriger la perte de cohérence due aux franges résiduelles. La figure 3-9 présente le résultat pour la pente de 75 degrés.

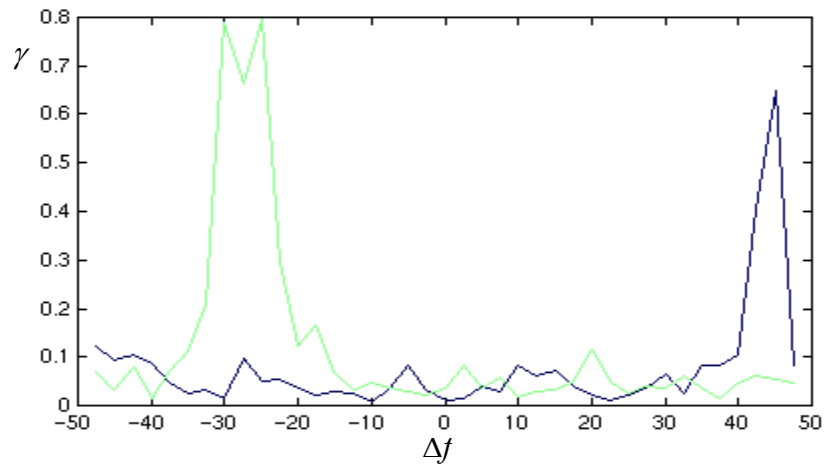


FIGURE 3-8. Cohérence de pente en fonction du décalage spectral Δf , exprimé en pourcentage de la bande passante B , pour deux pentes (cf. tableau 3-3).

pente (degrés)	$\Delta f_{\max} / B$	
	attendu	mesuré
— 75,0	– 26,93%	– 27%
— 8,53	45,39%	45%

TABEAU 3-3. Comparaison entre les décalages fréquentiels mesurés et attendus.

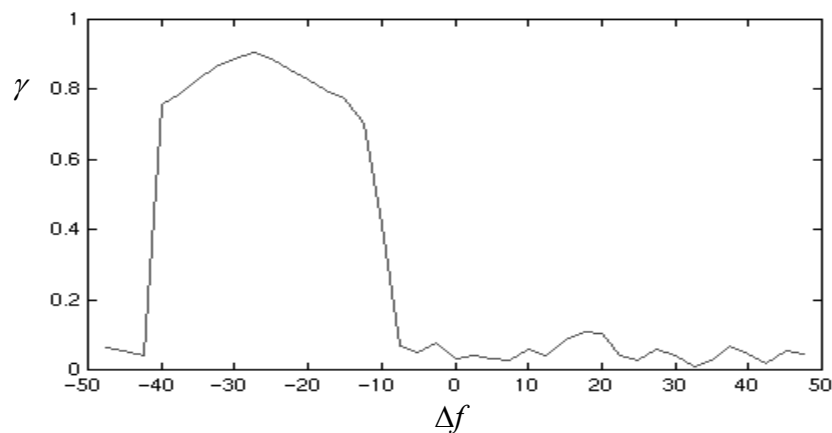


FIGURE 3-9. Cohérence en fonction du décalage spectral Δf , exprimé en pourcentage de la bande passante B , avec soustraction des franges résiduelles, dans le cas de la pente de 75 degrés.

Les pentes brutales, sur les bords du pic de la figure 3-9, correspondent à un décrochage du procédé d'estimation de Φ : les franges résiduelles sont trop serrées et trop bruitées. Avec un pas fréquentiel plus faible, le maximum de cohérence reste détectable. Du reste, l'objectif n'est pas réellement de déterminer avec précision le décalage spectral pour mesurer la pente, mais d'estimer au mieux ce décalage afin de produire un interférogramme filtré comportant un minimum de franges résiduelles.

Autre méthode de détection

Il faut noter que le calcul de la fonction de corrélation des spectres en distance de chaque couple interférométrique permet d'aboutir à des conclusions similaires, dans le cas où aucun modèle de franges n'est employé. Les pics de corrélation observés sont identiques à ceux de la figure 3-8. Je ne présenterai pas ici les résultats. Cependant, nous pouvons retenir que l'analyse des variations fréquentielles de la cohérence de pente est équivalente à une corrélation de spectre lorsque la bande sélectionnée est $B_{s,\text{simple}}$ (pas de sommation de sous-vues) et qu'aucun modèle de franges n'est soustrait lors du calcul de la cohérence. Cette équivalence intuitive doit pouvoir être démontrée mathématiquement notamment grâce au théorème de Parseval-Plancherel.

3.2.1.3. Détection des pentes dans une zone de repliement

Nous allons maintenant appliquer le même type de traitement dans le cas où les deux signaux associés aux deux pentes précédentes sont superposés. La largeur de bande spectrale B_s est choisie constante et inférieure à $B_{s,\text{simple}}$, quel que soit le décalage spectral Δf . Nous avons donc un nombre de sous-vues supérieur à 1 mais dépendant du décalage spectral (cf. équation (3.232)). Ainsi, il est réellement intéressant d'appliquer le calcul interférométrique de pente. Cette fois-ci, la ligne de base choisie vaut 2000 m.

Sur la figure 3-10, nous avons de nouveau représenté l'évolution de la cohérence en fonction du décalage spectral Δf , exprimé en pourcentage de la bande passante B . Nous observons bien deux maxima correspondant aux décalages spectraux liés aux deux pentes ($-15,39\%$ et $25,94\%$). L'une des valeurs maximales est plus faible que l'autre, car le signal provenant de cette pente est moins énergétique. En effet, les deux signaux ne pouvant être parfaitement séparés par la technique du filtrage, chaque signal apporte un bruit parasite à l'autre interférogramme de pente. Ce bruit est d'autant plus important que l'énergie du signal est grande. L'interférogramme de pente du signal le moins énergétique est ainsi plus bruité et sa cohérence est donc plus faible.

pente (degrés)		$\Delta f_{\text{max}} / B$	
		attendu	mesuré
pic 1	75,0	-15,39%	-16%
pic 2	8,53	25,94%	26%

TABLEAU 3-4. Comparaison entre les décalages fréquentiels mesurés et attendus, dans le cas de deux pentes formant une zone de repliement.

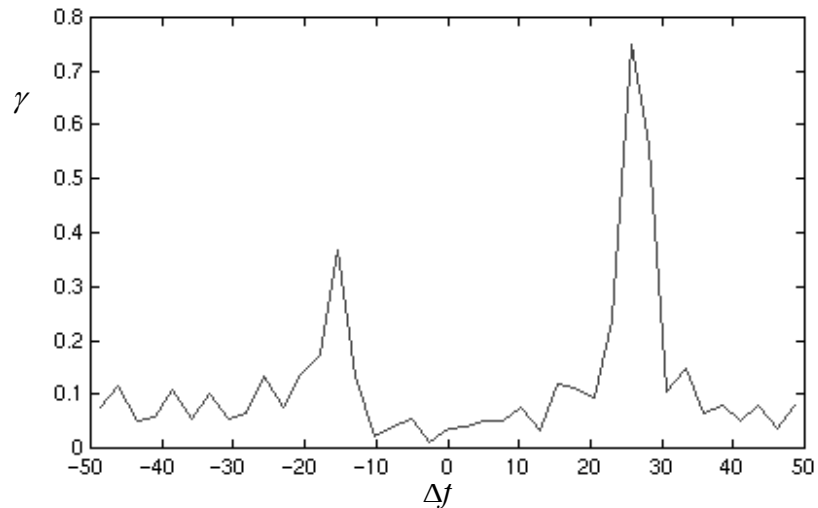


FIGURE 3-10. Cohérence en fonction du décalage spectral Δf , exprimé en pourcentage de la bande passante B , dans le cas de deux pentes formant une zone de repliement.

Le problème peut être partiellement résolu en réduisant la largeur de bande spectrale B_s , car cela accroît la séparabilité des signaux. Ainsi, nous pouvons observer que la cohérence augmente lorsque la largeur de bande B_s diminue (cf. figure 3-11). Cependant, en réduisant B_s , nous dégradons la résolution, et par voie de conséquence, le bruit et le biais du calcul de la cohérence augmentent. C'est ce que traduit la figure 3-12, qui représente l'évolution du rapport signal sur bruit des valeurs maximales de la cohérence.

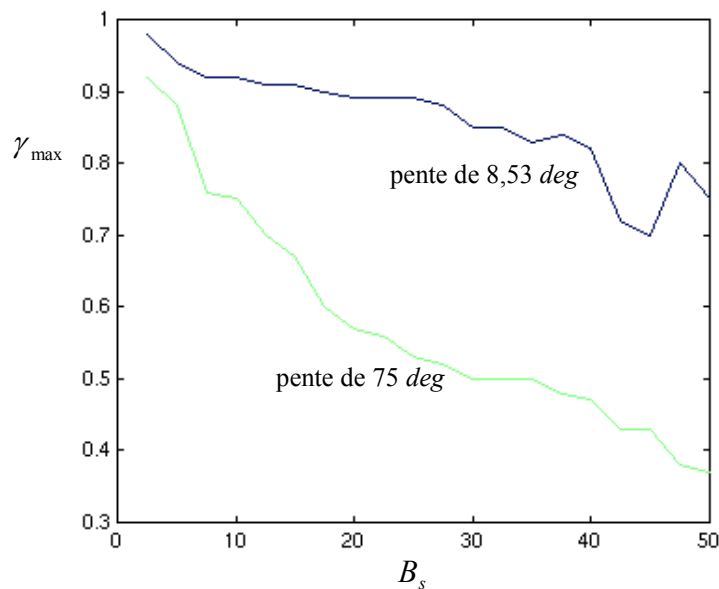


FIGURE 3-11. Évolution des valeurs maximales des pics de la cohérence en fonction de la largeur de bande B_s (exprimée en % de B).

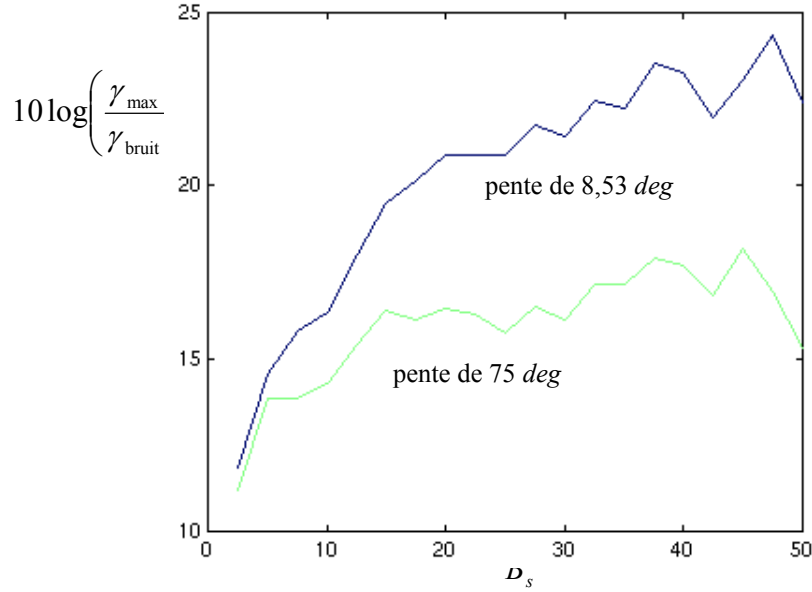


FIGURE 3-12. Évolution du rapport signal sur bruit (en dB) des valeurs maximales des pics de la cohérence, en fonction de la largeur de bande B_s (exprimée en % de B).

3.2.1.4. Détection des repliements

Dans la mesure où nous sommes capables de détecter des pentes d'après les maxima de la cohérence de pente, nous sommes aussi en mesure de détecter les repliements par cette méthode. En effet, le signe du décalage spectral d'un maximum est une signature du repliement, comme je le rappelle ci-après.

Souvenons-nous tout d'abord de (1.114) :

$$\Delta f \approx -\frac{1}{k_{\text{st}}} f_0 \frac{b \cos(\theta - \alpha_b)}{R \tan(\theta - \alpha_q)} \quad (3.233)$$

Supposons maintenant que :

$$\theta < \alpha_q \quad (3.234)$$

Cela signifie que :

$$\theta - \alpha_q > 0 \quad (3.235)$$

$$\tan(\theta - \alpha_q) > 0 \quad (3.236)$$

D'après l'équation du décalage spectral (3.233), nous avons :

$$-\frac{1}{k_{\text{st}}} f_0 \frac{b \cos(\theta - \alpha_b)}{R \Delta f} > 0 \quad (3.237)$$

$$\text{signe}(\Delta f) = -\text{signe}(\cos(\theta - \alpha_b)) \quad (3.238)$$

Nous disposons maintenant d'une méthode permettant de détecter la présence d'un repliement. En effet, si nous détectons un pic de la cohérence de pente pour un décalage fréquentiel Δf vérifiant l'égalité (3.238), cela signifie que pour cette visée radar, la différence $\theta - \alpha_q$ étant alors négative, la surface est bien en repliement. Si tel est le cas, il n'est pas nécessaire de détecter un autre maximum de la cohérence. En outre, les signaux provenant normalement des autres pentes peuvent être faibles ou masqués et donc leurs pics peuvent être indétectables.

3.2.1.5. Limitations

Séparabilité des signaux de pentes différentes

Pour séparer les signaux de deux pentes différentes, leurs décalages spectraux doivent être distincts. Les signaux sont d'autant plus séparables que leur différence de décalage spectral Δf_s est grande vis-à-vis de la bande passante B . Nous définissons donc la séparabilité en fréquence s_f de signaux de pentes $pente_1$ et $pente_2$ par le rapport suivant :

$$s_f = \frac{\Delta f_s}{B} = \frac{|\Delta f(pente_2) - \Delta f(pente_1)|}{B} \quad (3.239)$$

Cette séparabilité requiert une valeur minimale pour que la séparation par interférométrie de pente ait un sens. Considérons que la taille de la zone de repliement est de N_r pixels en distance. Techniquement, il est nécessaire d'avoir au moins un écart Δf_s qui soit supérieur au décalage spectral minimal mesurable F_e/N_r sur cette zone, sinon l'interférométrie de pente appliquée serait identique pour les deux pentes et les signaux ne seraient pas séparés :

$$\frac{F_e}{N_r} \leq \Delta f_s \quad (3.240)$$

$$\frac{1}{N_r} \frac{F_e}{B} \leq s_f \quad (3.241)$$

Contraintes sur la largeur de bande sélectionnée

Les interférogrammes résultant de l'interférométrie de pente ont une résolution dépendant de la largeur de bande sélectionnée B_s . De la même manière que précédemment, cette technique requiert une largeur minimale pour être applicable :

$$\frac{F_e}{N_r} \leq B_s \quad (3.242)$$

Dans le cas de l'égalité, aucun déroulement de phase ne serait réalisable, puisque la résolution de l'interférogramme serait de l'ordre de la taille de la zone étudiée.

En outre, la largeur de bande spectrale sélectionnée B_s pour chaque interférométrie de pente doit être, de préférence, inférieure à Δf_s . En effet, l'interférométrie de pente sélectionne deux bandes de spectre décalées pour une pente considérée. Or, si la largeur de bande sélectionnée B_s est plus grande que la différence de décalage spectral Δf_s (correspondant à deux pentes), alors une partie de ces bandes correspond à une réponse commune décalée pour l'autre pente. La largeur de bande supplémentaire ajoute donc une partie du signal cohérent (en fréquence) de l'autre pente et n'augmente pas la séparabilité des signaux. Cela signifie que l'accroissement apparent de résolution ne change rien à la séparabilité des signaux dans ce cas limite. D'où :

$$\frac{F_e}{N_r} \leq B_s \leq \Delta f_s \quad (3.243)$$

$$\frac{1}{N_r} \frac{F_e}{B} \leq \frac{B_s}{B} \leq s_f \quad (3.244)$$

Limites sur le nombre de sous-vues

Lorsque la largeur de bande B_s diminue, le nombre de sous-vues augmente (pour une pente et un décalage spectral Δf donnés) en proportion, selon la formule (3.232), au détriment de la résolution :

$$nb_{\text{sous-vues}} = N_r \frac{B - |\Delta f| - B_s}{F_e} + 1 \quad (3.245)$$

Compte tenu de la condition (3.243) sur la largeur de bande sélectionnable, nous avons la contrainte suivante sur le nombre de sous-vues :

$$N_r \frac{B - |\Delta f|}{F_e} - N_r \frac{\Delta f_s}{F_e} + 1 \leq nb_{\text{sous-vues}} \leq N_r \frac{B - |\Delta f|}{F_e} \quad (3.246)$$

Cas du repliement

Dans le cas d'une zone de repliement, les décalages spectraux des deux pentes sont de signes opposés, ce qui signifie que :

$$\Delta f_s = |\Delta f(\text{pente}_1)| + |\Delta f(\text{pente}_2)| \quad (3.247)$$

C'est-à-dire que nous avons, d'après (3.246) :

$$N_r \frac{B - 2|\Delta f(\text{pente}_1)| - |\Delta f(\text{pente}_2)|}{F_e} + 1 \leq nb_{\text{sous-vues},1} \leq N_r \frac{B - |\Delta f(\text{pente}_1)|}{F_e} \quad (3.248)$$

$$N_r \frac{B - |\Delta f(\text{pente}_1)| - 2|\Delta f(\text{pente}_2)|}{F_e} + 1 \leq nb_{\text{sous-vues},2} \leq N_r \frac{B - |\Delta f(\text{pente}_2)|}{F_e} \quad (3.249)$$

Le nombre de sous-vues $nb_{\text{sous-vues}}$ doit être supérieur ou égal à 1 pour que l'interférométrie de pente ait un sens (dans le cas où ce nombre est égal à 1, cela revient à un filtrage adapté à la pente). Nous avons donc les deux conditions suivantes :

$$1 \leq N_r \frac{B - |\Delta f(\text{pente}_1)|}{F_e} \quad (3.250)$$

$$1 \leq N_r \frac{B - |\Delta f(\text{pente}_2)|}{F_e} \quad (3.251)$$

Soit :

$$2 \leq N_r \frac{2B - |\Delta f(\text{pente}_1)| - |\Delta f(\text{pente}_2)|}{F_e} \quad (3.252)$$

$$2 \leq N_r \frac{2B - \Delta f_s}{F_e} \quad (3.253)$$

$$\Delta f_s \leq 2 \left(B - \frac{F_e}{N_r} \right) \quad (3.254)$$

Finalement, la différence de décalage spectral Δf_s entre signaux de pentes différentes doit vérifier les inégalités suivantes, pour que l'interférométrie de pente soit utilisable pour la séparation des signaux dans une zone de repliement :

$$\frac{F_e}{N_r} \leq \Delta f_s \leq 2 \left(B - \frac{F_e}{N_r} \right) \quad (3.255)$$

Ou encore :

$$\frac{F_e}{N_r} \leq |\Delta f(\text{pente}_1)| + |\Delta f(\text{pente}_2)| \leq 2 \left(B - \frac{F_e}{N_r} \right) \quad (3.256)$$

3.2.2. Reconstruction dans une zone de repliement

3.2.2.1. Reconstruction par Interférométrie de Pente (RIP)

Principes généraux

En raison de la complexité du signal dans les zones de repliement, l'information interférométrique est systématiquement ignorée dans ces zones. Le signal n'est pas exploité, notamment en raison de la faiblesse de la cohérence, mais surtout parce que plusieurs signaux correspondant à des pentes totalement différentes sont superposés. La phase interférométrique perd donc son sens classique, puisque les postulats (*cf.* section 1.2.1.2) ne sont plus vérifiés.

L'idée est donc de chercher à traiter séparément les signaux correspondant aux différentes pentes dans la zone de repliement, afin de permettre une reconstruction « 3D ». Sachant que la séparabilité des signaux se fait au détriment de la résolution, les interférogrammes de pente produits sont donc de faible résolution. Cependant, dans la mesure où l'information dans la zone de repliement est normalement ignorée, le gain est important en terme de renseignement.

Limitations

Nous savons que la différence de décalage spectral doit vérifier les inégalités (3.255), pour que le filtrage de pente soit applicable. Cette inégalité peut être rapportée à « l'altitude d'ambiguïté » E_a , grandeur introduite par Massonnet [Massonnet 1985, Massonnet 1993b] qui correspond à la différence d'altitude qui produit un tour de phase complet dans un interférogramme stéréoscopique. Or, la variation de phase produite par une variation d'altitude δh est donnée par l'égalité (1.156) :

$$\delta \varphi_{2 \rightarrow 1} \approx \frac{4\pi b \cos(\theta - \alpha_b)}{k_{st} \lambda R_{b1} \sin(\theta)} \delta h + \dots \quad (3.257)$$

Nous en déduisons, pour un tour de phase de 2π :

$$2\pi = \frac{4\pi b \cos(\theta - \alpha_b)}{k_{st} \lambda R_{b1} \sin(\theta)} E_a \quad (3.258)$$

C'est-à-dire :

$$E_a = \frac{k_{st} \lambda R_{b1} \sin(\theta)}{2b \cos(\theta - \alpha_b)} \quad (3.259)$$

Cette définition est un peu différente de celle proposée par Massonnet, car elle généralise les trajectoires de porteurs. Si nous posons $\alpha_b = 0$ (les trajectoires se situent à la même altitude), nous obtenons la même formulation que Massonnet :

$$E_a(\alpha_b = 0) = \frac{k_{st} \lambda R_{b1} \tan(\theta)}{2b} \quad (3.260)$$

À partir des égalités (1.114) et (3.259), et sachant que $f_0\lambda = c$, nous pouvons écrire l'expression du décalage spectral en fonction de l'altitude d'ambiguïté :

$$|\Delta f(\theta, \alpha_q)| \approx \frac{c}{2E_a} \left| \frac{\sin(\theta)}{\tan(\theta - \alpha_q)} \right| \quad (3.261)$$

Or d'après l'équation (3.256) nous avons :

$$\frac{F_e}{N_r} \leq \frac{c}{2E_a} \left(\left| \frac{\sin(\theta)}{\tan(\theta - \alpha_{q1})} \right| + \left| \frac{\sin(\theta)}{\tan(\theta - \alpha_{q2})} \right| \right) \leq 2 \left(B - \frac{F_e}{N_r} \right) \quad (3.262)$$

Et d'après les définitions de la fréquence d'échantillonnage F_e (cf. équation (1.2)) et de la bande passante B (cf. équation (1.11)), nous avons :

$$\frac{1}{N_r} \frac{c}{2\delta_d} \leq \frac{c}{2E_a} \left(\left| \frac{\sin(\theta)}{\tan(\theta - \alpha_{q1})} \right| + \left| \frac{\sin(\theta)}{\tan(\theta - \alpha_{q2})} \right| \right) \leq 2 \left(\frac{ck}{2\Delta_d} - \frac{1}{N_r} \frac{c}{2\delta_d} \right) \quad (3.263)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{k}{\Delta_d} - \frac{1}{N_r} \frac{1}{\delta_d} \right)^{-1} \leq \frac{E_a}{|\sin(\theta)|} \left(\left| \frac{1}{\tan(\theta - \alpha_{q1})} \right| + \left| \frac{1}{\tan(\theta - \alpha_{q2})} \right| \right)^{-1} \leq N_r \delta_d \quad (3.264)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta_d}{k} \left(1 - \frac{1}{kN_r} \frac{\Delta_d}{\delta_d} \right)^{-1} \leq \frac{E_a}{|\sin(\theta)|} \left(\left| \frac{1}{\tan(\theta - \alpha_{q1})} \right| + \left| \frac{1}{\tan(\theta - \alpha_{q2})} \right| \right)^{-1} \leq N_r \delta_d \quad (3.265)$$

Je vais m'intéresser au cas particulier où les pentes en repliement sont telles que $\alpha_{q1} = 0 \text{ rad}$ et $\alpha_{q2} = \pi/2 \text{ rad}$, c'est-à-dire au cas d'une façade de bâtiment de hauteur H :

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta_d}{k} \left(1 - \frac{1}{kN_r} \frac{\Delta_d}{\delta_d} \right)^{-1} \leq \frac{E_a}{|\sin(\theta)|} \left(\left| \frac{1}{\tan(\theta)} \right| + \left| \frac{1}{\tan(\theta - \pi/2)} \right| \right)^{-1} \leq N_r \delta_d \quad (3.266)$$

Si nous considérons que $\theta \in [0, \pi/2]$:

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta_d}{k} \left(1 - \frac{1}{kN_r} \frac{\Delta_d}{\delta_d} \right)^{-1} \leq \frac{E_a}{\sin(\theta)} \left(\frac{1}{\tan(\theta)} + \tan(\theta) \right)^{-1} \leq N_r \delta_d \quad (3.267)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta_d}{k} \left(1 - \frac{1}{kN_r} \frac{\Delta_d}{\delta_d} \right)^{-1} \leq \frac{E_a}{\sin(\theta)} \frac{\tan(\theta)}{1 + \tan^2(\theta)} \leq N_r \delta_d \quad (3.268)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta_d}{k} \left(1 - \frac{1}{kN_r} \frac{\Delta_d}{\delta_d} \right)^{-1} \leq E_a \cos(\theta) \leq N_r \delta_d \quad (3.269)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta_d}{k} \tan(\theta) \left(1 - \frac{1}{kN_r} \frac{\Delta_d}{\delta_d} \right)^{-1} \leq E_a \sin(\theta) \leq N_r \delta_d \tan(\theta) \quad (3.270)$$

Nous remarquons que $N_r \delta_d \tan(\theta)$ est la hauteur H du bâtiment :

$$\frac{1}{2} \frac{\Delta_d}{k} \tan(\theta) \left(1 - \frac{1}{kN_r} \frac{\Delta_d}{\delta_d} \right)^{-1} \leq E_a \sin(\theta) \leq H \quad (3.271)$$

La méthode RIP n'est donc applicable sur les bâtiments que si l'altitude d'ambiguïté E_a vérifie (3.271).

Par ailleurs, nous pouvons grossièrement écrire que $\Delta_d = k\delta_d$ et donc, pour N_r supérieur ou égal à 2, les inégalités (3.271) peuvent être simplifiées en :

$$\frac{1}{2}\delta_d \tan(\theta) \leq E_a \sin(\theta) \leq H \quad (3.272)$$

Pour les systèmes aéroportés, l'altitude d'ambiguïté (cf. égalité (3.259)) vaut généralement plusieurs dizaines de mètres, parce que :

- la ligne de base peut difficilement être supérieure à quelques mètres ;
- la distance de l'antenne au bâtiment peut difficilement être inférieure à quelques kilomètres ;
- la longueur d'onde est rarement inférieure à quelques centimètres.

Cela signifie que la seconde inégalité de l'encadrement (3.272) n'est normalement pas vérifiée en conditions aéroportées et que donc la méthode RIP n'est pas applicable. En revanche, il est parfaitement possible de définir un système spatial à haute résolution vérifiant ces mêmes conditions. La première inégalité est quant à elle habituellement garantie, puisqu'elle est une condition nécessaire au déroulement de franges en général.

3.2.2.2. Méthode de déroulement RIP « 2D » pour des bâtiments

Hypothèses de reconstruction

Je présente maintenant une méthode de reconstruction du « 3D » dans le cas où nous avons une connaissance *a priori* sur les pentes observées. Je considère une façade de bâtiment tournée vers le radar (cf. figure 3-13-a). L'idée est de chercher à interpréter le signal dans la zone de repliement, afin d'exploiter la phase interférométrique pour la reconstruction. La méthode est illustrée à l'aide de simulations réalisées par 2SIR en conditions interférométriques stéréoscopiques (les conditions exactes de simulation seront précisées dans le paragraphe 3.2.2.3). Nous oublions pour l'instant les coins réflecteurs, observables généralement sur une façade de bâtiment, et nous considérons une façade homogène sans aspérité.

La figure 3-13-b présente un interférogramme simulé sur un tel modèle de bâtiment. Au premier abord, il semble contenir dans sa partie centrale quatre franges bruitées. En réalité, il n'y a aucun tour de phase complet et les méthodes de déroulement de phase classiques échouent à reconstruire autre chose qu'un sol plat. En effet, deux signaux interférométriques avec des sens de rotation de la phase inversés sont superposés dans cette zone. Il est donc nécessaire de les séparer.

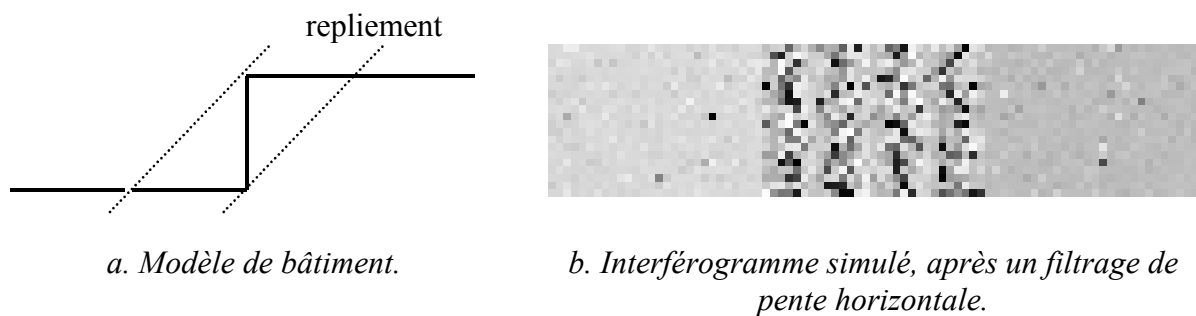


FIGURE 3-13. Modèle « 2D » d'un bâtiment et son interférogramme simulé par 2SIR.

En comparaison, nous pouvons considérer l'interférogramme (cf. figure 3-14-b) obtenu sur une rampe dont la géométrie est comparable à celle du bâtiment, sauf qu'elle ne présente pas de repliement (cf. figure 3-14-a).

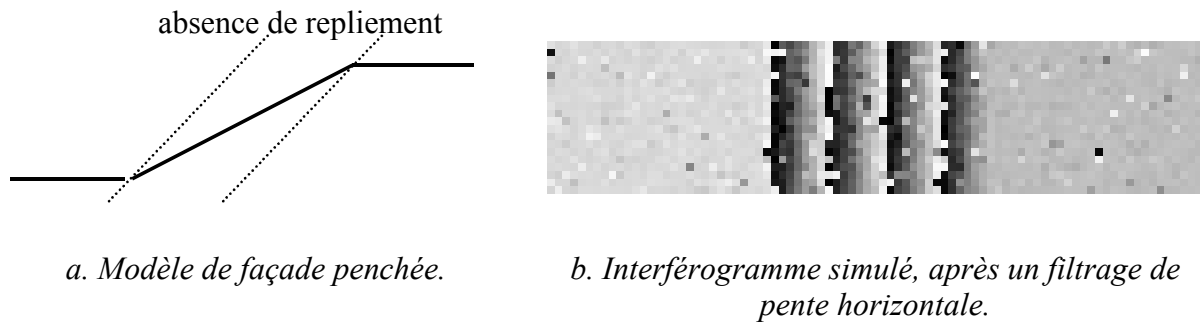


FIGURE 3-14. Modèle « 2D » d'une rampe et son interférogramme simulé par 2SIR.

Nous pouvons calculer les interférogrammes de pente I_h et I_v correspondant à des pentes horizontale et verticale. La cohérence C_h mesurée sur I_h est proche de celle que nous obtenons par des méthodes classiques de calcul de la cohérence. Elle est donc très faible dans la zone de repliement du bâtiment. En outre, cette cohérence est également plus faible, dans le cas de la rampe, dans la partie en pente (cf. figure 3-15-a), ce qui est dû à la perte de cohérence sur la pente liée au décalage spectral des signaux.

En revanche, la cohérence C_v (mesurée sur l'interférogramme vertical) est meilleure sur la partie en repliement du bâtiment (cf. figure 3-15-b), puisqu'il y a une contribution de la partie verticale du bâtiment. L'interférogramme I_v obtenu dans la zone de repliement du bâtiment doit donc être plus facilement déroulable dans cette zone. La cohérence n'est cependant pas maximale (proche de 1), car la phase est bruitée par les contributions des parties horizontales.

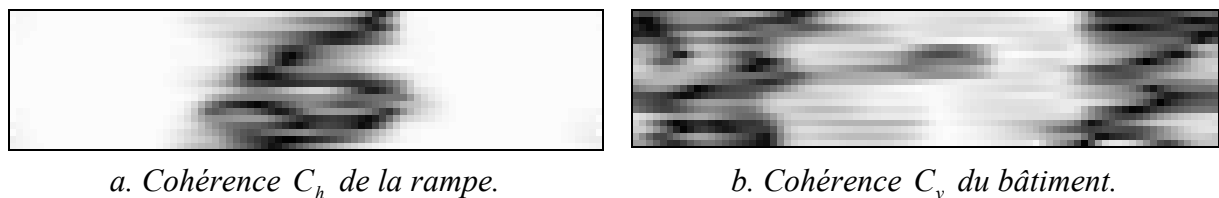


FIGURE 3-15. Cohérences de pente mesurées.

La méthode proposée consiste à dérouler les interférogrammes de pente pour lesquels la cohérence de pente est localement maximale, lorsque le décalage spectral varie. En pratique, le temps de calcul imparti est trop important pour pouvoir considérer toutes les cohérences de pente possibles. Nous pouvons nous restreindre à seulement deux pentes probables. Il suffit ensuite de dérouler la phase sur l'interférogramme, qui présente localement la cohérence la plus importante des deux. Cependant, ce principe n'est efficace que si chaque pente apporte une contribution identique, en terme d'énergie, au signal de la zone de repliement. Or, les contributions ne sont que très rarement identiques, et le signal le plus faible sera systématiquement plus bruité que l'autre, après séparation. Les cohérences n'étant donc pas directement comparables, il est plutôt conseillé d'introduire un seuil V sur la cohérence.

Il faut noter que le fait de restreindre le nombre de pentes considérées ne signifie pas que les pentes sélectionnées dans la reconstruction sont imposées. En effet, c'est le déroulement des interférogrammes résultants qui détermine la géométrie « 3D ». Cependant, si les pentes

réelles sont nettement distinctes, les interférogrammes sont fortement bruités et la reconstruction est moins bonne.

Étapes du déroulement de la phase dans le cas du repliement

Le processus de déroulement de la phase est décrit selon une géométrie « 2D », bien qu'il conduise à une reconstruction « 3D », c'est-à-dire que je considère un déroulement dans la direction de la distance, sans prendre en compte le comportement de la phase selon la direction de l'azimut. La reconstruction est donc effectuée de manière totalement indépendante entre les différentes lignes d'azimut constant : les problèmes de continuité entre lignes ne sont pas pris en compte.

Je suppose que les interférogrammes et cohérences de pente ont été calculés pour une pente horizontale et une pente verticale. Le déroulement complet de la phase s'effectue en suivant un cycle en quatre étapes, décrites sur les figures suivantes :

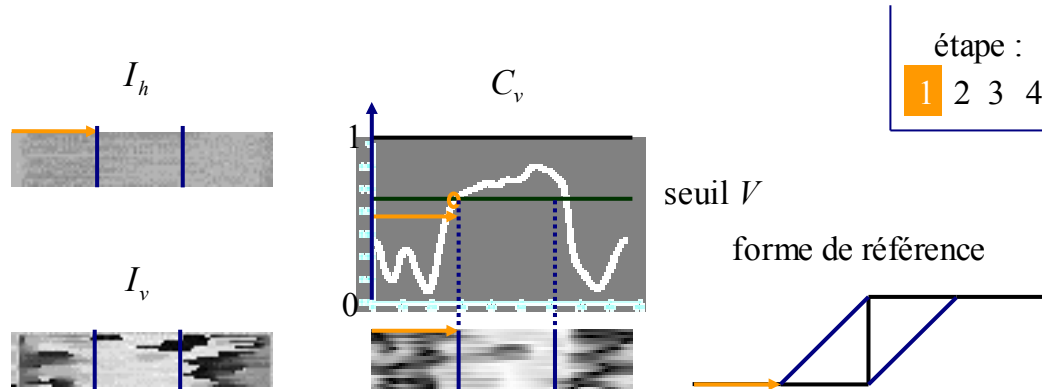


FIGURE 3-16. Étape 1 de la méthode RIP appliquée à une zone de repliement. La phase est déroulée sur l'interférogramme I_h , tant que la cohérence C_v est inférieure à un seuil V .

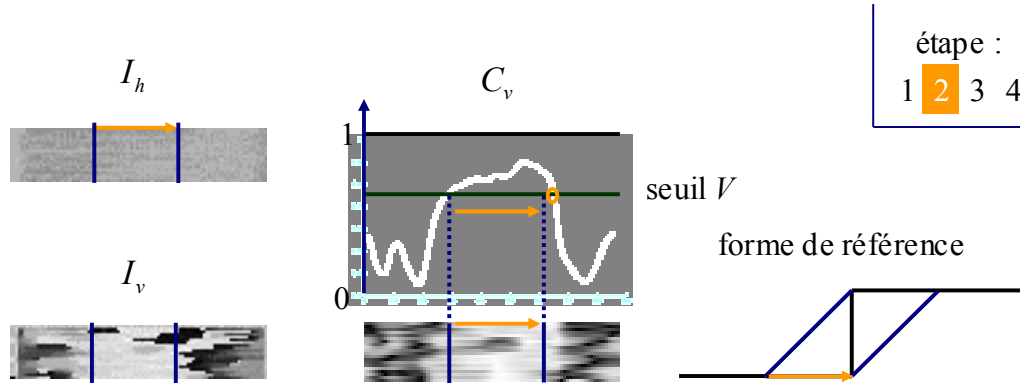


FIGURE 3-17. Étape 2 de la méthode RIP appliquée à une zone de repliement. Nous entrons dans une zone de repliement, mais la phase continue à être déroulée sur l'interférogramme I_h , jusqu'à ce que la cohérence C_v redescende au dessous du seuil V .

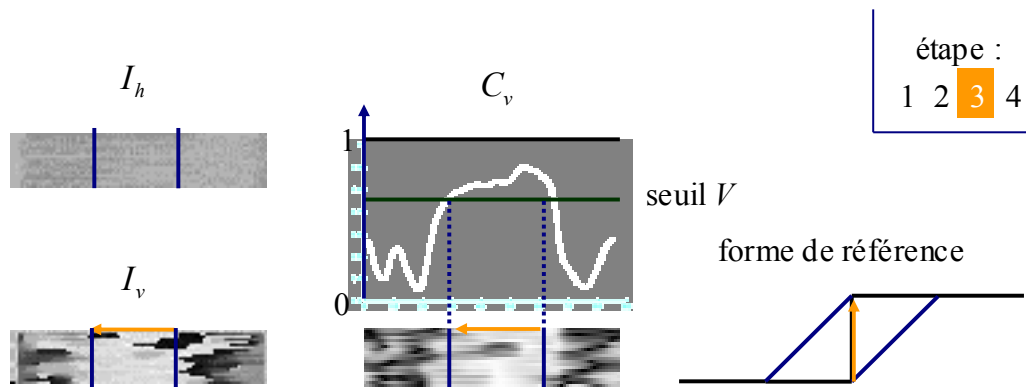


FIGURE 3-18. Étape 3 de la méthode RIP appliquée à une zone de repliement. La phase est ensuite déroulée sur l'interférogramme I_v , dans le sens décroissant de la distance, puisque cette surface est en repliement, jusqu'à atteindre le début de la zone de repliement.

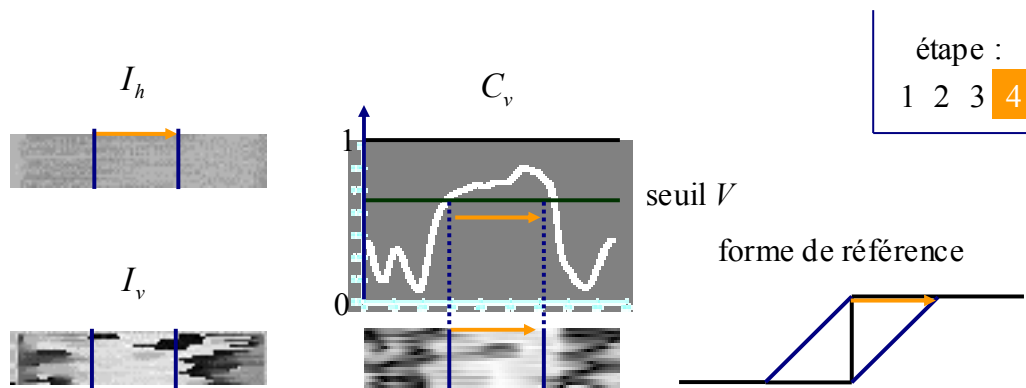


FIGURE 3-19. Étape 4 de la méthode RIP appliquée à une zone de repliement. De nouveau, la phase est déroulée sur l'interférogramme I_h jusqu'à la fin de la zone de repliement. La forme de la surface reconstruite sur le sommet est donc identique à celle reconstruite devant le bâtiment. Pour différencier ces surfaces, il serait nécessaire que leurs pentes soient différentes. Dans ce cas, une troisième interférométrie de pente devrait être réalisée.

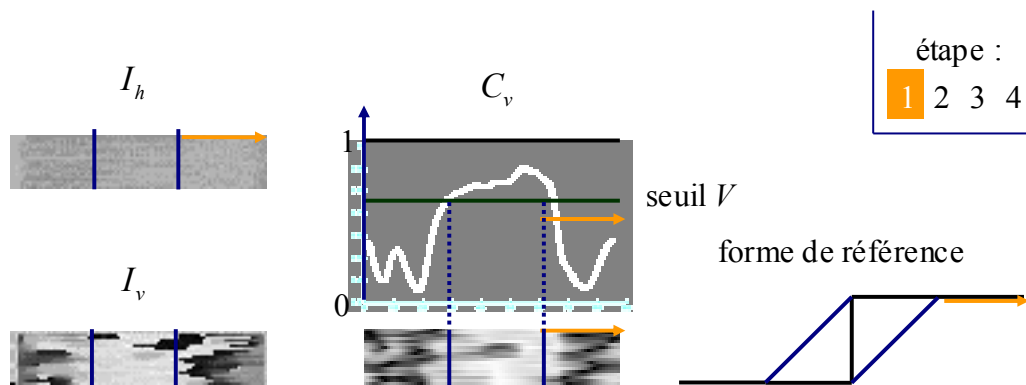


FIGURE 3-20. Étape 1-bis de la méthode RIP appliquée à une zone de repliement. Le déroulement de phase est repris de manière identique à l'étape 1, depuis la fin du repliement.

Je donne ci-après des exemples d'application de cette méthode. Je rappelle que le fait d'avoir sélectionné des filtres de pentes horizontale et verticale n'impose pas que la surface reconstruite soit composée uniquement de facettes horizontales et verticales. C'est le

déroulement des interférogrammes qui définit le relief, le filtrage définissant uniquement la séparabilité des pentes.

3.2.2.3. Exemples de reconstructions d'une simulation de bâtiment

Simulations

Les exemples de reconstruction ont été réalisés sur des simulations produites par 2SIR. Il n'existe en effet aucune donnée réelle à haute résolution présentant le décalage spectral adéquat (cf. paragraphe 3.2.2.1).

nom du paramètre	notation	valeur	unité
longueur d'onde (bande X)	λ	0,031714	mètres
bande spectrale	B	$299,79 \cdot 10^6$	Hertz
polarisation	sans objet	VV	sans objet
type de matériau	sans objet	béton	sans objet
pas en distance	δ_d	0,5	mètres
pas en azimuth	δ_a	0,5	mètres
taille de la fenêtre d'estimation en distance	sans objet	1	pixels
taille de la fenêtre d'estimation en azimuth	sans objet	5	pixels
distance moyenne de la facette	R_b	800 000	mètres
ligne de base	b	voir Δf	mètres
décalage spectral	Δf	7 par défaut	% B
angle d'incidence	θ	45	degrés
angle d'inclinaison	α_b	0	degrés
pente locale	α_q	0, 30 ou 90	degrés
hauteur du bâtiment ou de la rampe	$H_{\text{bât}}$	20	mètres

TABLEAU 3-5. Paramètres employés par 2SIR pour la simulation de la réponse interférométrique d'un modèle de bâtiment.

Le livre de Ulaby [Ulaby 1989] ne fournit pas suffisamment de données pour définir un modèle de rétrodiffusion réaliste pour un bâtiment. Le modèle a donc été ajusté de manière à correspondre à un modèle intermédiaire entre celui de la route et celui du sol rocheux. De toute manière, c'est surtout le comportement de la phase qui nous intéresse.

La méthode RIP « 2D » a été appliquée avec une bande passante sélectionnée telle que :

$$B_s = \Delta f \quad (3.273)$$

Le calcul de la cohérence s'effectue dans une fenêtre de taille 1×5 , avec un noyau de pondération unidimensionnel appliqué dans la direction de l'azimut :

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.274)$$

La taille de la fenêtre est unitaire en distance afin d'obtenir une grande finesse d'échantillonnage de la cohérence en distance.

Résultats

Les résultats de reconstruction sont représentés par des maillages « 3D en fil de fer » superposés au modèle théorique de l'objet représenté en « 3D plein » opaque ou transparent, afin de pouvoir aisément les comparer.

Nous observons sur les figures 3-21-a,b qu'une méthode exploitant directement la phase interférométrique filtrée reconstruit de manière quasi-exacte une rampe, mais ne parvient absolument pas à reconstruire le modèle de bâtiment. D'aucun pourrait répondre que la méthode de déroulement de franges employée est archaïque et que cela explique donc son insuccès sur ces franges plus complexes. Cependant, il faut garder à l'esprit que le problème ne provient pas d'une incapacité de l'algorithme à dérouler des franges complexes bruitées, mais bien du fait qu'il n'y a pas réellement de franges, puisque la phase ne fait pas de rotation complète de 0 à 2π . Elle ne fait qu'osciller autour d'une valeur moyenne, en raison des battements entre les deux signaux superposés, dont les fréquences sont de signes opposés (sens de rotation de la phase inverses).

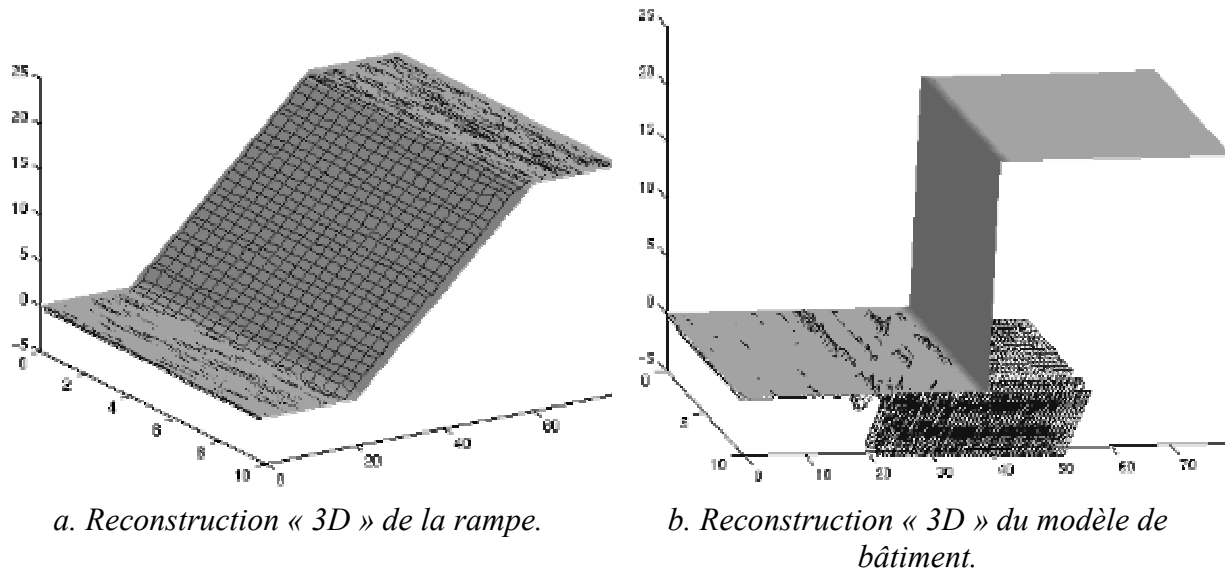
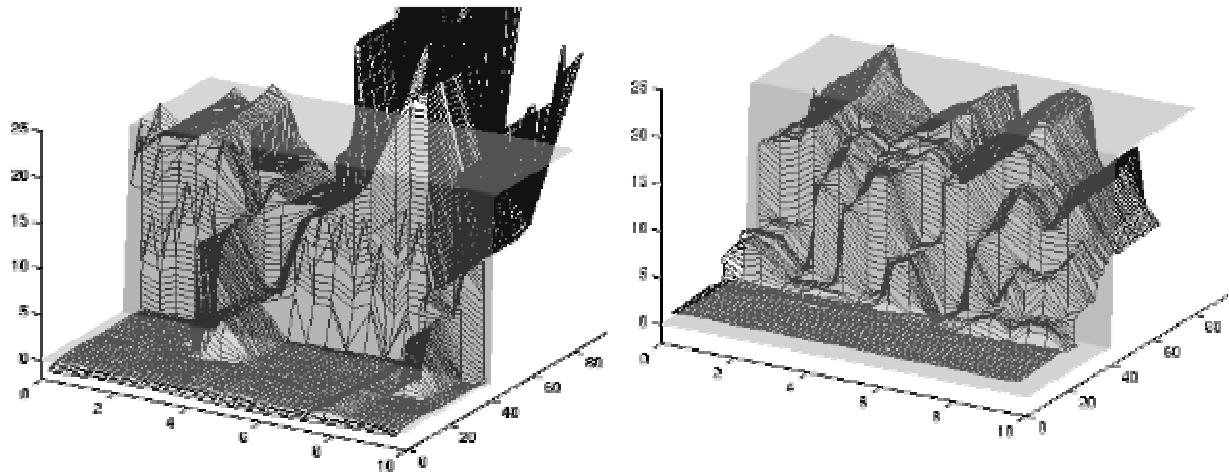


FIGURE 3-21. Reconstruction « 3D » d'un modèle de bâtiment et d'une rampe, dans le cas d'une méthode classique de reconstruction par interférométrie radar.

La figure 3-22 donne des exemples de reconstructions « 3D » obtenues par la méthode RIP pour différents décalages spectraux. La méthode RIP permet donc d'exploiter le signal de la zone de repliement pour produire une reconstruction sur ces simulations. La qualité de la reconstruction dépend du décalage spectral et du seuil choisis pour la détection du repliement, comme cela est présenté dans le paragraphe suivant.



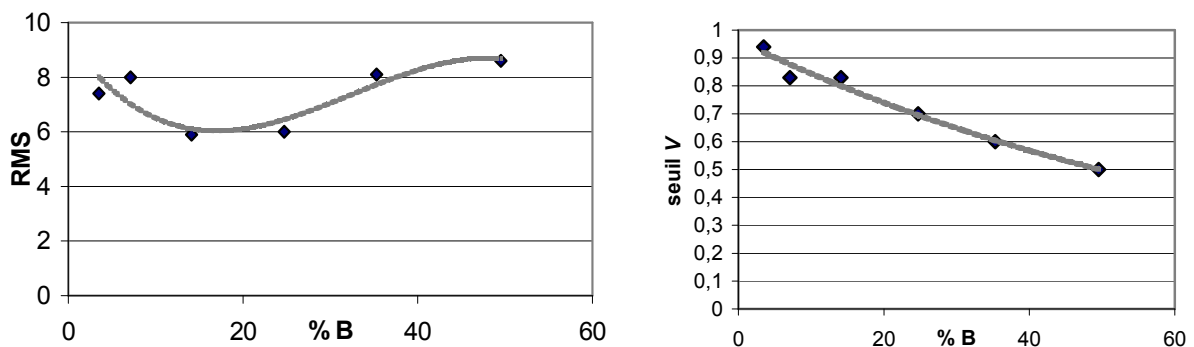
a. Résultat obtenu pour un faible décalage spectral (très inférieur au quart de la largeur de bande B).

b. Résultat obtenu pour un décalage spectral moyen (quart de la largeur de bande B).

FIGURE 3-22. Résultats de la RIP pour différents décalages spectraux, sur un modèle de bâtiment.

Rôle du décalage spectral

J'ai considéré différents décalages spectraux (donc différentes lignes de base) et j'ai recherché la valeur optimale (estimée grossièrement, au sens de la meilleure reconstruction « 3D », en testant plusieurs valeurs) pour le seuil V de détection du repliement, pour chaque cas. L'erreur quadratique moyenne (RMS en anglais) des écarts verticaux au relief réel obtenue dans chaque cas, ainsi que le paramètre V retenu, ont été reportés sur les graphiques 3-23-a,b. Le nombre de mesures réalisées est faible (6 décalages spectraux), mais il semblerait qu'il existe un décalage spectral optimal pour la méthode RIP. À 20% de B , le décalage spectral est suffisant pour permettre une bonne séparabilité des signaux et conserver un nombre important de sous-vues (quelques dizaines) pour l'addition cohérente des interférogrammes.



a. Variation de la RMS entre la reconstruction « 3D » et le modèle, en fonction du décalage spectral.

b. Variation du seuil V employé pour la détection du repliement, en fonction du décalage spectral.

FIGURE 3-23. Effets du décalage spectral (et donc de la ligne de base) sur la qualité de la reconstruction « 3D » et sur le seuil de détection du repliement.

Il faut noter que la RMS estimée donne une mesure biaisée de la qualité de la reconstruction. En effet, elle est mesurée entre hauteurs verticales, pour différentes positions en distance, et une mesure de l'erreur quadratique moyenne entre surfaces serait probablement plus adaptée. Sinon, une faible erreur de localisation de la façade du bâtiment produit un accroissement important de la RMS, même si la forme est reconstruite avec précision.

En ce qui concerne le seuil V , sa valeur optimale décroît avec le décalage spectral (cf. figure 3-23-b), ce qui est en conformité avec la décroissance de la cohérence observée dans le paragraphe 3.2.1.3, puisque $B_s = \Delta f$.

Si nous considérons les exemples de reconstructions (cf. figure 3-24-a,b) obtenues pour différents décalages spectraux, nous observons le caractère « haché » de la reconstruction, dû au fait que chaque ligne de phase est déroulée indépendamment des autres. Il semble évident que l'aspect global de la reconstruction pourrait être sérieusement amélioré si le voisinage azimuthal était pris en compte dans la reconstruction.

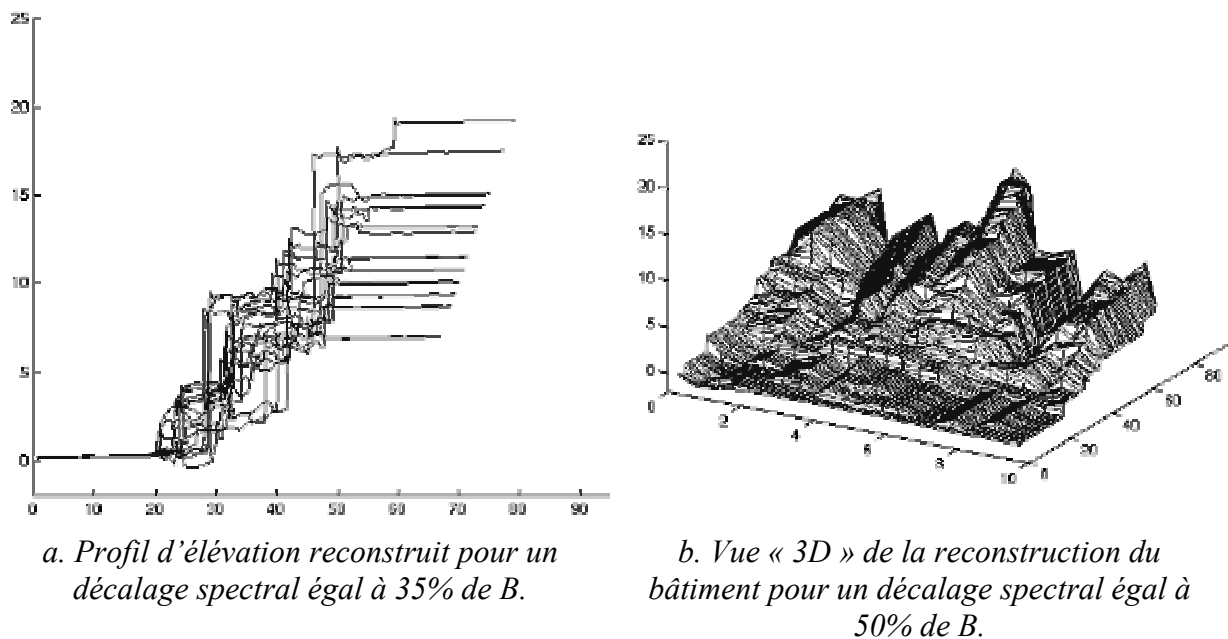


FIGURE 3-24. Exemples de reconstructions pour différents décalages spectraux.

Impact des doubles rebonds

Nous savons que de nombreuses réponses du type dièdre ou trièdre peuvent être observées sur les façades de bâtiments, en raison de rebonds multiples de l'onde radar sur les coins de bâtiments. En particulier, les doubles rebonds entre une façade de bâtiment et la surface qui lui fait face produisent une ligne d'échos forts localisés au pied du bâtiment.

J'ai donc réalisé des simulations prenant en compte ces doubles rebonds et j'ai testé la méthode RIP. Le résultat obtenu (cf. figure 3-25) est de bien moindre qualité. La RMS est de 20 mètres, les mesures de cohérence sont en effet perturbées par les échos forts du double rebond et il est impossible de trouver un seuil qui permette une reconstruction correcte. Nous savons en effet que de tels échos corréleront la phase spatialement et produisent donc une valeur de la cohérence forte mais non pertinente. Par conséquent, il est nécessaire de retirer les signaux produits par les coins réflecteurs avant d'appliquer la méthode RIP. Des résultats similaires à ceux de la figure 3-25 seraient obtenus pour d'autres décalages spectraux.

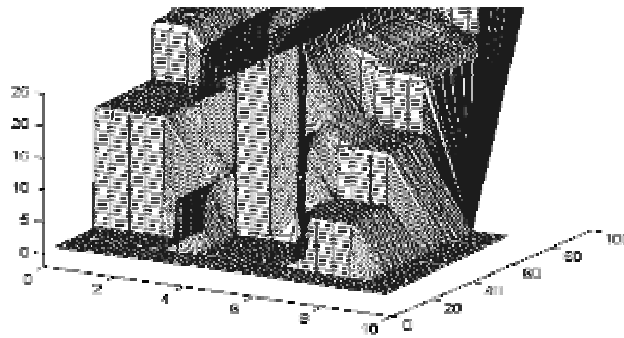


FIGURE 3-25. Vue « 3D » d'une reconstruction de bâtiment dans le cas d'une simulation où les phénomènes de double rebond ont été pris en compte et pour un décalage spectral égal à seulement 3,5% de B .

3.3 Conclusions

J'ai présenté une technique interférométrique permettant d'améliorer la qualité d'un interférogramme, en sommant les sous-vues filtrées du couple d'images sources et en tenant compte de la pente possible. J'ai proposé une extension de cette technique, que j'appelle « interférométrie de pente », d'une part à la détection des repliements, d'autre part à la séparation des signaux dans la zone de repliement. Ce procédé a été étudié grâce à des simulations produites avec 2SIR et d'après son principe théorique. Il a été souligné que l'amélioration se fait au détriment de la résolution interférométrique.

L'interférométrie de pente m'a permis d'élaborer une méthode pour reconstruire par interférométrie radar des objets présentant des repliements. La méthode dénommée « Reconstruction par Interférométrie de Pente » (RIP) a été également testée sur des simulations réalisées avec 2SIR. Elle fournit des résultats d'autant plus intéressants que les signaux présents dans une zone de repliement sont usuellement ignorés. La méthode apporte donc une information supplémentaire relativement pertinente. Cependant, les simulations produites en tenant compte de rebonds multiples sur des façades de bâtiments ont souligné que la méthode est totalement perturbée par les échos forts et cohérents résultant des doubles rebonds.

Des tests sur données réelles n'ont malheureusement pas pu être réalisés, car aucun capteur ayant une résolution et une ligne de base suffisantes n'était disponible au moment du travail de thèse. Ce travail pourra donc être prolongé, aussi bien d'un point de vue théorique que pratique, au moment où de telles données seront disponibles.

4. Reconstruction optimisée du « 3D »

J'ai souligné, au cours des chapitres précédents, les difficultés rencontrées lors de la reconstruction du « 3D » par interférométrie radar à haute résolution et j'ai présenté des méthodes pour résoudre certaines difficultés par des techniques de traitement du signal. Il apparaît évident que ces traitements sont insuffisants pour obtenir une reconstruction satisfaisante du « 3D ». Je vais maintenant chercher à optimiser cette reconstruction en employant, d'une part, des techniques du traitement d'images (morphologie mathématique, filtres, etc.) et, d'autre part, des techniques de l'analyse d'images (exploitation de modèles d'objets). En outre, je me suis appuyé sur des concepts issus de la logique floue pour ces traitements, afin d'améliorer la pertinence des résultats. Il faut noter que les travaux présentés dans le cadre de ce chapitre constituent une simple prospective sur les moyens à mettre en œuvre pour une reconstruction optimisée du « 3D ».

4.1 Présentation des données

4.1.1. Données RAMSES

L'essentiel des travaux présentés dans ce chapitre ont été réalisés à partir de données RAMSES aimablement prêtées par l'ONERA. Les couples d'images radar stéréoscopiques ont été acquis sur Dunkerque. Si aucune précision n'est donnée sur le capteur source, il s'agit par défaut du capteur RAMSES. Les données de travail sont extraites de trois quartiers de la partie urbaine et péri-urbaine que nous appelons quartier1, quartier2 et quartier3.

nom du paramètre	notation	valeur	unité
longueur d'onde (bande X)	λ	0,031714	mètres
bande spectrale	B	$\geq 200.10^6$	Hertz
polarisation	sans objet	VV	sans objet
pas en distance	δ_d	≤ 1	mètres
pas en azimuth	δ_a	≤ 1	mètres
distance moyenne de la scène	R_b	5 000	mètres
ligne de base	b	≤ 1	mètres
angle d'incidence	θ	45 en moyenne	degrés

TABLEAU 4-1. Conditions d'acquisition des données RAMSES.

4.1.2. Données AeS

Certains travaux se sont parfois appuyés sur des données du capteur AeS de la société Intermap (dont AeroSensing est maintenant une composante). Ces données ont été obtenues sur la forêt d'Haguenau et concernent donc essentiellement les milieux naturels. Les conditions d'acquisition sont énoncées dans le tableau 4-2.

nom du paramètre	notation	valeur	unité
longueur d'onde (bande X)	λ	0,031714	mètres
bande spectrale	B	$\geq 400.10^6$	Hertz
polarisation	sans objet	VV	sans objet
pas en distance	δ_d	0,5	mètres
pas en azimuth	δ_a	0,25	mètres
distance moyenne de la scène	R_b	5 000	mètres
ligne de base	b	≤ 1	mètres
angle d'incidence	θ	45 en moyenne	degrés

TABLEAU 4-2. Conditions d'acquisition des données AeS.

4.2 Reconstruction des surfaces

4.2.1. Surfaces naturelles

4.2.1.1. Surfaces canoniques

La reconstruction du relief par interférométrie radar est proposée depuis plusieurs années par de nombreux industriels. Mais elle est surtout efficace pour des surfaces canoniques ne présentant pas de repliement, avec des pentes faibles, situées hors des zones urbaines et pour des longueurs d'onde garantissant que l'onde ne traverse ni ne pénètre les éléments de la scène. Cela signifie qu'elle est relativement efficace pour des surfaces naturelles avec des petites longueurs d'onde (c'est-à-dire plutôt dans la bande X).

La figure 4-1 présente le relief reconstruit dans le cas d'une lisière de forêt, à proximité du village d'Haguenau, dans le nord-est de la France. La « 3D » a été vérifiée sur le terrain par le SERTIT (Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection, Université de Strasbourg), et la reconstruction a été jugée très satisfaisante puisqu'il est possible de détecter un tronc couché au sol.

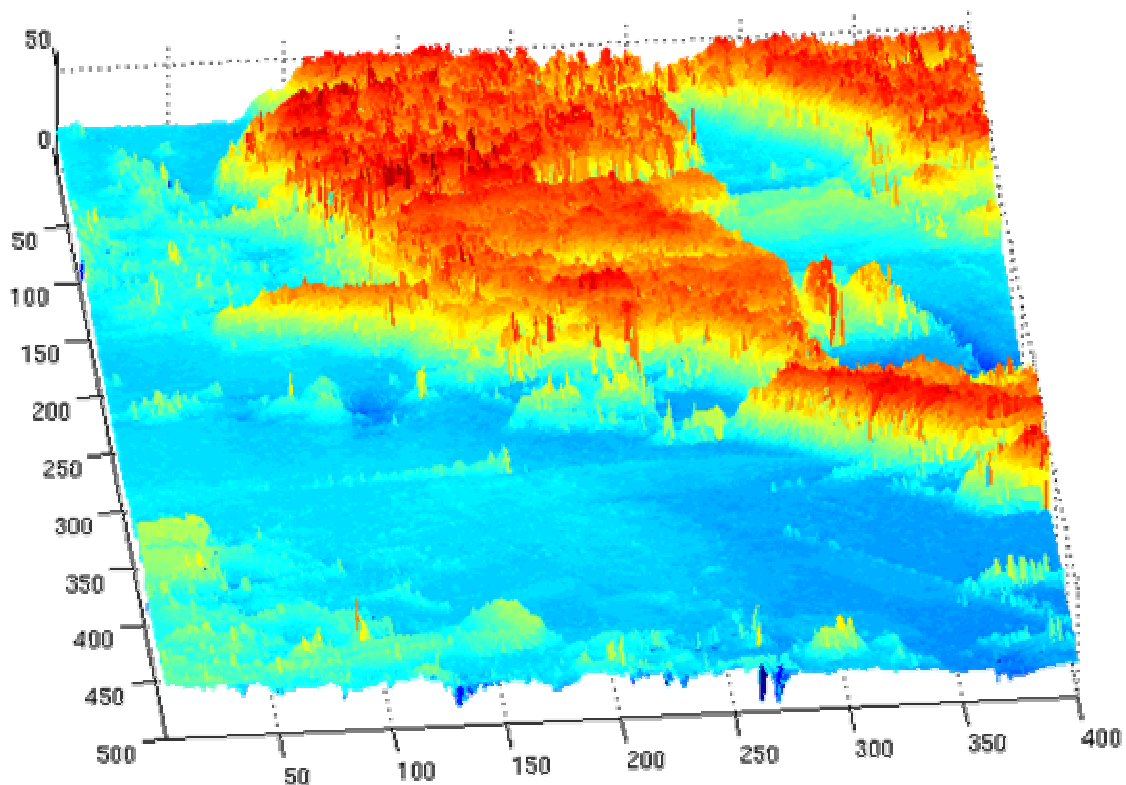


FIGURE 4-1. *Vue « 3D » en fausses couleurs du relief d'une lisière de forêt près de Haguenau, reconstruit par interférométrie radar par la société Aerosensing (capteur AeS bande X, droits CNES).*

4.2.1.2. Reliefs tourmentés

La reconstruction devient plus complexe lorsque le relief est tourmenté, comme par exemple pour une zone montagneuse. En effet, nous nous écartons du domaine de validité des postulats interférométriques, et de nombreux repliements peuvent être rencontrés. Les repliements ne peuvent être séparés et traités efficacement par une méthode RIP, puisqu'ils ne vérifient pas les hypothèses de pente stationnaire ni de surface homogène. Ce type de relief a partiellement été étudié dans le chapitre 3.

4.2.1.3. Interactions volumiques

Les données réelles sur lesquelles nous avons travaillé ne présentent que très peu d'interactions volumiques. Bien que 2SIR permette de modéliser ce type d'interactions, nous avons choisi de porter notre intérêt sur les zones semi-urbaines en bande X. Les problèmes liés aux reliefs tourmentés et aux interactions volumiques restent donc marginaux dans le cadre de ce travail.

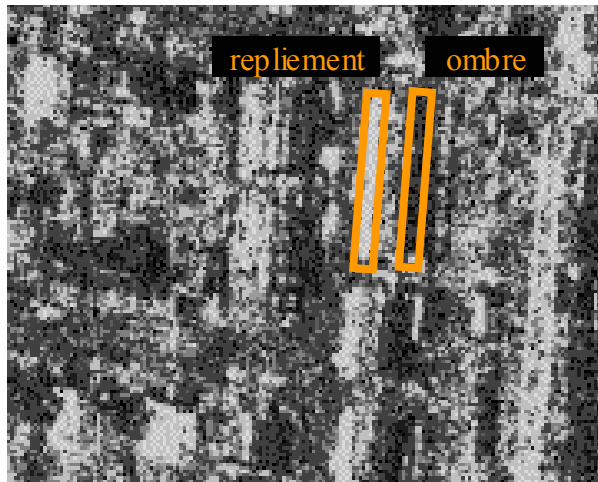
4.2.2. Surfaces anthropiques

4.2.2.1. Interférométrie appliquée aux bâtiments

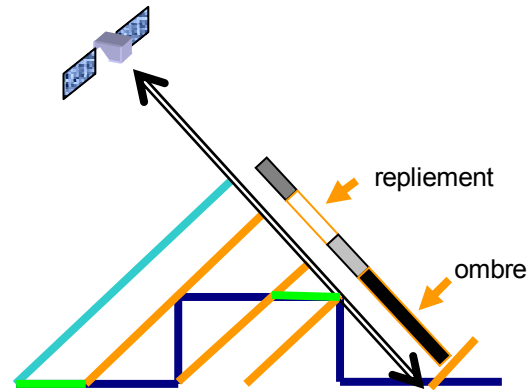
Rappel sur les différents éléments composant une image radar de bâtiment

Nous nous sommes déjà intéressés aux bâtiments dans le chapitre 3. La figure 4-2-a donne un exemple d'image réelle de scène urbaine. La figure 4-2-b représente les différents éléments

que nous pouvons distinguer sur l'image, pour certains bâtiments. Les parties vertes représentent les seules portions de signal où la phase interférométrique est directement exploitable. Le repliement et l'ombre définissent une autre partie de la signature d'un bâtiment. La méthode RIP ne peut s'appliquer sur les zones de repliement de ces données réelles, car la différence de décalage spectral est insuffisante (cf. sous-paragraphe « Limitations » du paragraphe 3.2.2.1). L'ombre est en revanche une source utile d'information, comme le soulignent les travaux de Simonetto [Simonetto 2002a, Simonetto 2002b].



a. Amplitude d'une image radar de bâtiments et décomposition en différents éléments radiométriques (extrait du quartier2).



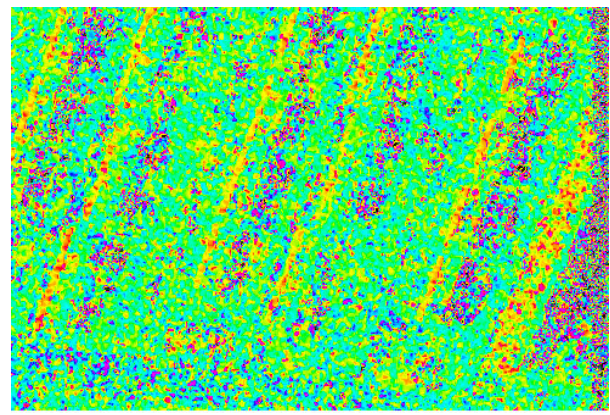
b. Géométrie radar d'observation d'un bâtiment.

FIGURE 4-2. Projection radar de bâtiments.

Calcul interférométrique



a. Amplitude radar.



b. Phase interférométrique radar.

FIGURE 4-3. Amplitude radar et phase interférométrique mesurées sur une zone urbaine (quartier3).

L'image 4-3-b présente un exemple d'interférogramme (filtre de taille 3×3) obtenu à partir d'un couple stéréoscopique de données radar du quartier3. L'amplitude d'une des deux images radar est fournie sur l'image 4-3-a. Nous constatons que l'interférogramme est très bruité (en particulier dans les zones d'ombre) ou tout au moins très complexe à employer pour

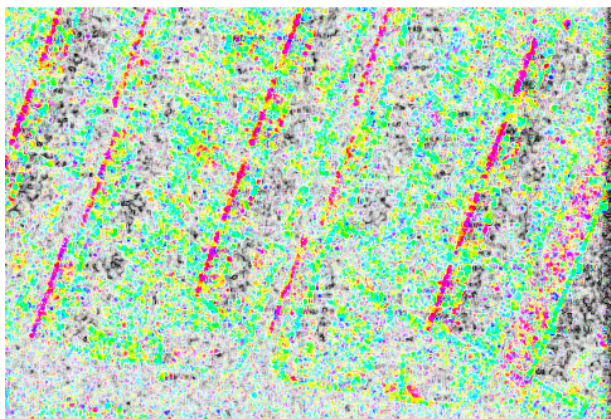
une reconstruction « 3D ». La géométrie radar ne permet pas de retrouver directement la forme « 3D » des bâtiments. Nous disposons simplement d'une « signature » des bâtiments.

4.2.2.2. Interférométrie appliquée aux coins réflecteurs

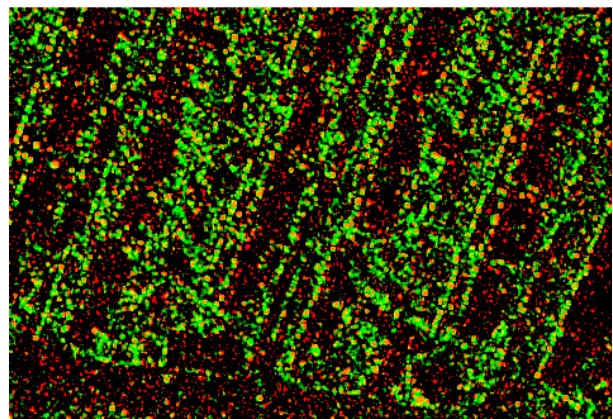
Localisation des coins réflecteurs

Le comportement des coins réflecteurs (dièdres ou trièdres) a été présenté dans le paragraphe 1.1.2.4. Les façades de bâtiments constituent d'excellents candidats pour ce genre de phénomène. Je propose, sur l'image 4-4-a, une représentation ITS-CPA (Intensité/Teinte/Saturation pour coder Cohérence/Phase/Amplitude) d'un interférogramme urbain. Nous pouvons observer des lignes diagonales rouges. Cette représentation permet de faire ressortir le signal, très cohérent et de forte amplitude, des façades de bâtiments. La phase est très stable le long de ces façades, et le pied du mur est donc parfaitement localisé en « 3D » (cf. paragraphe 1.2.2.3 et figure 1-31) [Simonetto 2002a].

L'image 4-4-b combine l'affichage de la corrélation spatiale de la phase (canal rouge) et de la cohérence interférométrique (canal vert). Afin d'augmenter la lisibilité de l'image, une dynamique non linéaire a été employée pour le canal rouge. Nous pouvons constater que les points présentant une forte corrélation spatiale de la phase ne sont pas nécessairement des points cohérents et réciproquement. En revanche, les éléments de l'image dont la corrélation spatiale de la phase et la cohérence interférométrique sont fortes simultanément (représentés en jaune) sont, d'après la théorie (cf. chapitre 2 et paragraphe 2.3.2.5), des points parfaitement localisés en « 3D ». En outre, cette représentation permet de faire ressortir les structures linéaires de certains bâtiments.



a. Représentation ITS-CPA : l'Intensité code la Cohérence interférométrique ; la Teinte code la Phase interférométrique ; la Saturation code l'Amplitude des images.



b. Codage sur deux canaux de la corrélation spatiale de la phase (canal rouge) et de la cohérence interférométrique (canal vert).

FIGURE 4-4. Différentes représentations du signal interférométrique, de l'amplitude, de la cohérence et de la corrélation spatiale de la phase d'une zone urbaine (quartier3).

Prise en compte des coins réflecteurs

Les coins réflecteurs constituent donc des points ou des lignes de référence précisément localisés en « 3D ». Cependant, leurs signaux peuvent perturber la reconstruction des éléments environnants. Considérons de nouveau le cas d'un bâtiment et supposons que son toit produise un signal radar puissant de bonne cohérence interférométrique. L'avant du toit est en repliement avec le mur de la façade dans la géométrie radar, et le signal du type « coin

réflecteur » associé au pied du mur apparaît au milieu du toit. La figure 4-5 donne un exemple de reconstruction erronée, due à la prise en compte incorrecte des coins réflecteurs. Ces éléments localisés servent de repères et de jalons, mais ne peuvent pas être directement employés pour la reconstruction « 3D » par déroulement de phase.

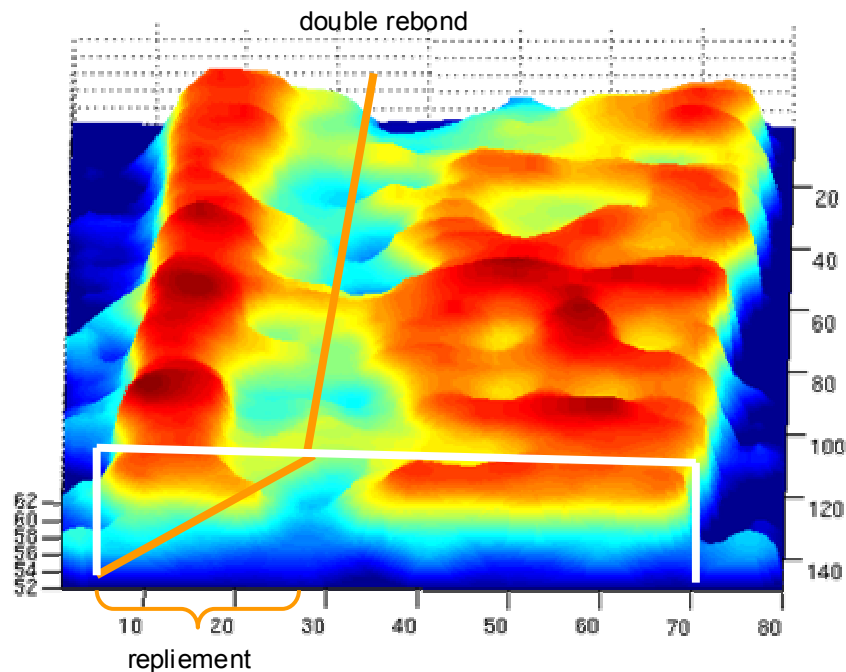


FIGURE 4-5. *Reconstruction « 3D » d'un bâtiment présentant une déformation due aux doubles rebonds sur sa façade (extrait du quartier1).*

4.2.2.3. Milieu urbain

Problématique

Si nous analysons l'image 4-6 (dont la carte IGN est représentée sur la figure 4-7), nous devinons la complexité des interactions mises en jeu et donc de la reconstruction « 3D ». En sus des problèmes de repliements, d'ombres et de coins réflecteurs, nous avons :

- des rebonds multiples de l'onde radar entre éléments de la scène ;
- des artefacts de la synthèse radar ;
- de nombreux objets lumineux isolés.

Le troisième point est loin d'être anodin. En effet, en milieu urbain, nous pouvons trouver de nombreux lampadaires, voitures, panneaux et autres objets métalliques susceptibles de produire de forts échos radar et donc une idée erronée de l'altitude. Le goudron et le béton produisent de faibles signaux, dont la signature interférométrique est peu cohérente et difficilement lisible. Or, les objets constitués de tels matériaux définissent souvent le niveau du sol, qui constitue un repère essentiel pour une reconstruction « 3D ».



FIGURE 4-6. Exemple d'image radar d'une zone urbaine (quartier2).

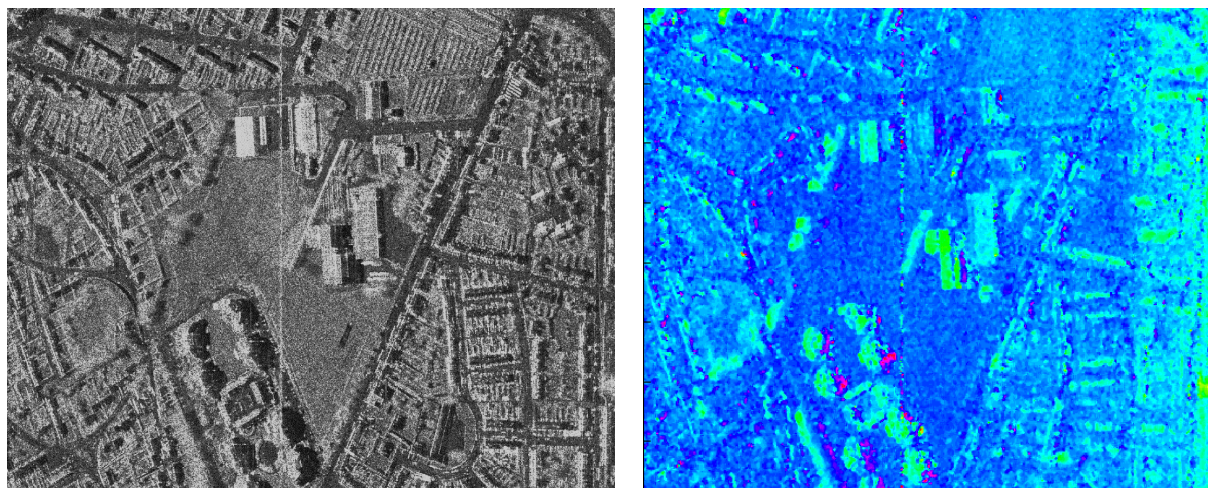


FIGURE 4-7. Carte IGN du quartier2.

Reconstruction à basse résolution

L'image 4-8-a est une image d'amplitude radar qui a servi de test à la reconstruction. Cette zone semi-urbaine comporte une grande variété de bâtiments, de zones goudronnées et bétonnées et un peu de végétation, comme le précise la carte IGN (*cf.* figure 4-10), l'image IKONOS à 3 mètres de résolution (*cf.* figure 4-9) et les photographies²⁵ (*cf.* figure 4-12). L'image 4-8-b présente l'interférogramme généré à partir du couple stéréoscopique. Bien que relativement bruité, il permet de distinguer des bâtiments et des structures. Cependant, si ce résultat est satisfaisant pour l'œil à basse résolution, il est insuffisant pour offrir une bonne reconstruction « 3D », comme je vais le montrer dans le prochain paragraphe.

²⁵ Photographies aimablement prises et fournies par Madame Van den Brucke.



a. Amplitude de l'image radar.

b. Phase interférométrique.

FIGURE 4-8. Image radar et interférogramme du quartier1.



FIGURE 4-9. Image Ikonos (résolution de 3 mètres) du quartier1.



FIGURE 4-10. Carte IGN du quartier1.

Reconstruction à haute résolution

L'image choisie est extraite de celle de la figure 4-8-a. Elle nous intéresse parce qu'elle comporte une large zone de végétation et de grands bâtiments (cf. figures 4-10 et 4-12). Le Modèle Numérique de Surface (MNS) obtenu à partir d'une méthode de reconstruction « classique » (s'appuyant sur les points cohérents et sur un filtre interférométrique de taille 7×7) est présenté sur la figure 4-14. La ville ne semble pas s'être remise des derniers bombardements : le MNS est plutôt chaotique. Bien que cela puisse ne pas paraître satisfaisant, il semble que le seul moyen d'améliorer le MNS soit de prendre en compte la nature même des objets que nous souhaitons reconstruire, ainsi que d'autres informations présentes dans l'image.



FIGURE 4-11. *Amplitude de l'image radar de l'extrait du quartier 1.*



FIGURE 4-12. *Photographies correspondant à l'extrait du quartier 1.*



FIGURE 4-13. *Extrait de carte IGN correspondant à l'extrait du quartier1.*

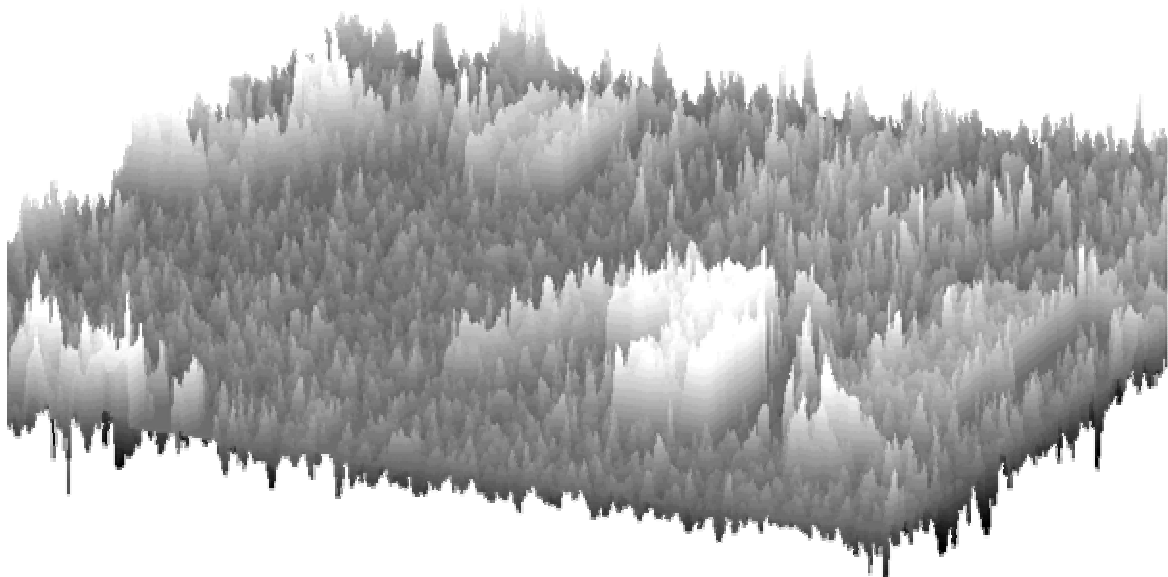


FIGURE 4-14. *Vue « 3D » d'un MNS réalisé par interférométrie radar sur l'extrait du quartier1.*

4.3 Reconstruction des objets de la scène

4.3.1. Éléments de logique floue employés

4.3.1.1. Problématique

La logique floue est fondée sur une algèbre numérique dont les valeurs manipulées sont comprises dans l'intervalle $[0,1]$. L'utilisation de la logique floue nécessite trois étapes :

- La quantification floue, ou « fuzzification », est chargée de transformer l'information numérique d'entrée en valeurs comprises entre 0 et 1, en définissant une fonction (non binaire) d'appartenance à un état.

- L'application de règles floues permet la traduction de relations logiques complexes, là où l'utilisation de seuils arbitraires pourrait poser problème.
- La « défuzzification » transforme l'information floue en un état binaire, étape qui est assimilable à une décision.

Il faut noter que la quantification floue n'élimine pas la notion de seuil mais introduit seulement une certaine latitude sur le point de transition de la fonction d'appartenance et contraint donc beaucoup moins la précision des seuils employés dans le processus opératoire.

4.3.1.2. Fuzzification et définition des fonctions d'appartenance

Principe de la fuzzification

Considérons un ensemble d'éléments Ω . Nous souhaitons en faire une partition en deux sous-ensembles, à partir d'une propriété P : le sous-ensemble $\Omega_{P=\text{vrai}}$ des éléments vérifiant la propriété P et le sous-ensemble $\Omega_{P=\text{faux}}$ des éléments ne vérifiant pas cette propriété. Pour chaque élément de Ω , nous disposons d'une mesure (ou « observable ») μ qui permet de caractériser si la propriété est vérifiée ou non. Nous pouvons donc définir une fonction $f_A : \mu \rightarrow f_A(\mu) = e \in \{0,1\}$, qui à toute mesure μ associe un état e dont la valeur 1 ou 0 indique, respectivement, si la propriété P est vérifiée ou non.

Cependant, les mesures réelles sont souvent entachées d'une erreur pouvant provenir de l'appareillage de mesure ou de l'estimateur. En outre, une seule observable n'est pas toujours suffisante pour décrire l'état d'un élément avec certitude. Cette incertitude sur l'état réel de l'élément n'est pas traduite correctement par un état binaire e . Une quantification floue, ou fuzzification, est donc préférable dans ce cas à une quantification binaire.

La fuzzification s'appuie sur une fonction d'appartenance, définie sur le domaine de variation de la donnée d'entrée (en général $[0, +\infty[$ ou $]-\infty, +\infty[$), dont la valeur de sortie appartient au domaine $[0,1]$. Elle définit une sorte de probabilité que la propriété P soit vérifiée, compte tenu de la mesure en entrée, bien que la définition de cette fonction soit généralement empirique plutôt que probabiliste. Cependant, lorsque les données d'apprentissage sont suffisamment nombreuses, il est possible de construire une fonction d'appartenance fondée sur la fonction de distribution de la probabilité d'appartenance.

Fonctions d'appartenance employées

Les possibilités de définition des fonctions d'appartenance sont infinies. J'ai choisi quatre modèles paramétrables de fonctions d'appartenance (cf. figure 4-15) :

- le modèle linéaire ;
- le modèle homographique ;
- le modèle polynomial ;
- le modèle homographique 2.

Ces fonctions sont continues sur le domaine de définition. Les modèles de fonction dépendent de trois paramètres : μ_d et μ_f sont les bornes du domaine en dehors duquel la fonction est identiquement nulle ; μ_s définit un seuil de transition (cf. figure 4-15).

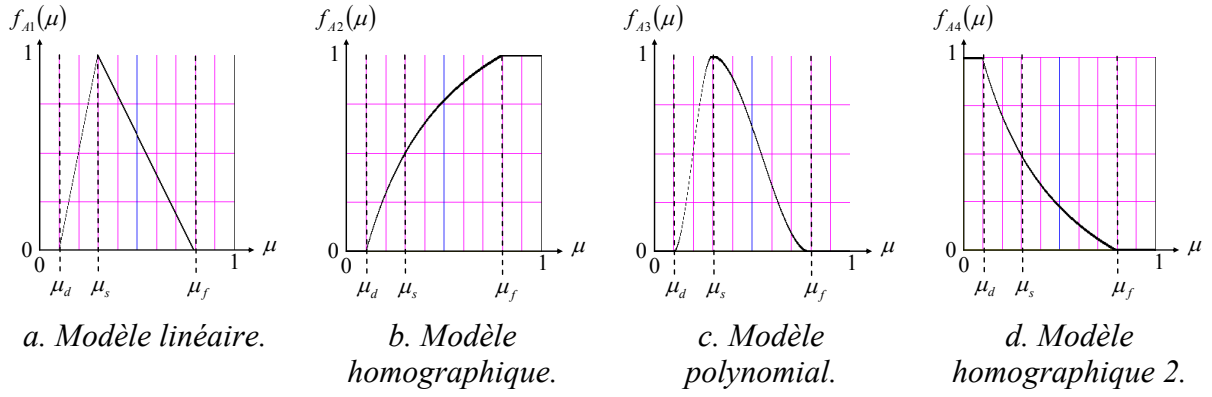


FIGURE 4-15. Exemples de fonctions d'appartenance floues. Le domaine de variation de la donnée d'entrée a été choisi identique à celui de sortie : $[0,1]$. Les paramètres choisis sont

$$\mu_d = 0,1, \mu_s = 0,3 \text{ et } \mu_f = 0,8.$$

Modèle linéaire

Il est défini par parties sur quatre intervalles, par deux fonctions constantes et deux fonctions linéaires. Les contraintes sur le modèle sont les suivantes :

$$\begin{cases} \mu \leq \mu_d \Rightarrow f_{A1}(\mu) = 0 \\ f_{A1}(\mu_s) = 1 \\ \mu \geq \mu_f \Rightarrow f_{A1}(\mu) = 0 \end{cases} \quad (4.275)$$

Nous avons donc :

$$\begin{cases} \mu_d \leq \mu \leq \mu_s \Rightarrow f_{A1}(\mu) = \frac{\mu - \mu_d}{\mu_s - \mu_d} \\ \mu_s \leq \mu \leq \mu_f \Rightarrow f_{A1}(\mu) = \frac{\mu_f - \mu}{\mu_f - \mu_s} \end{cases} \quad (4.276)$$

Modèle homographique

Il est défini par parties sur trois intervalles, par deux fonctions constantes et une fonction homographique (du type $m_1(\mu + m_2)/(\mu + m_3)$). Les contraintes sur le modèle sont les suivantes :

$$\begin{cases} \mu \leq \mu_d \Rightarrow f_{A2}(\mu) = 0 \\ f_{A2}(\mu_s) = 0,5 \\ \mu \geq \mu_f \Rightarrow f_{A2}(\mu) = 1 \end{cases} \quad (4.277)$$

Nous avons donc :

$$\mu_d \leq \mu \leq \mu_f \Rightarrow f_{A2}(\mu) = \frac{\mu_f - \mu_s}{\mu_d + \mu_f - 2\mu_s} \frac{\mu - \mu_d}{\mu + \frac{\mu_f \mu_s + \mu_d \mu_s - 2\mu_d \mu_f}{\mu_d + \mu_f - 2\mu_s}} \quad (4.278)$$

Modèle polynomial

Il est défini par parties sur quatre intervalles, par deux fonctions constantes et deux fonctions polynomiales de degré 3. Les contraintes sur le modèle sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu \leq \mu_d \Rightarrow f_{A3}(\mu) = 0 \\ \frac{df_{A3}}{d\mu}(\mu_d) = 0 \\ f_{A3}(\mu_s) = 1 \\ \mu \geq \mu_f \Rightarrow f_{A3}(\mu) = 0 \\ \frac{df_{A3}}{d\mu}(\mu_f) = 0 \end{array} \right. \quad (4.279)$$

Nous avons donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_d \leq \mu \leq \mu_s \Rightarrow f_{A1}(\mu) = \frac{2\mu^3 - 3(\mu_d + \mu_s)\mu^2 + 6\mu_d\mu_s\mu + \mu_d^2(\mu_d - 3\mu_s)}{(\mu_d - \mu_s)^3} \\ \mu_s \leq \mu \leq \mu_f \Rightarrow f_{A1}(\mu) = \frac{2\mu^3 - 3(\mu_f + \mu_s)\mu^2 + 6\mu_f\mu_s\mu + \mu_f^2(\mu_f - 3\mu_s)}{(\mu_f - \mu_s)^3} \end{array} \right. \quad (4.280)$$

Modèle homographique 2

Il est défini simplement par :

$$\forall \mu \in [0,1], f_{A4}(\mu) = 1 - f_{A2}(\mu) \quad (4.281)$$

Nous avons donc :

$$\mu_d \leq \mu \leq \mu_f \Rightarrow f_{A4}(\mu) = \frac{\mu_d - \mu_s}{\mu_d + \mu_f - 2\mu_s} \frac{\mu - \mu_f}{\mu + \frac{\mu_f\mu_s + \mu_d\mu_s - 2\mu_d\mu_f}{\mu_d + \mu_f - 2\mu_s}} \quad (4.282)$$

4.3.1.3. Relations floues

En logique floue, les relations entre états flous sont fondées sur trois opérateurs fondamentaux :

- l'opérateur binaire OU ;
- l'opérateur binaire ET ;
- l'opérateur unaire NON.

Opérateur OU ou t-conorme

Une t-conorme est un opérateur \oplus , défini de $[0,1]^2$ dans $[0,1]$, vérifiant les propriétés suivantes :

$$\text{commutativité} \quad e_1 \oplus e_2 = e_2 \oplus e_1 \quad (4.283)$$

$$\text{monotonie} \quad e_1 \geq e_3 \text{ et } e_2 \geq e_4 \Rightarrow e_1 \oplus e_2 \geq e_3 \oplus e_4 \quad (4.284)$$

$$\text{associativité} \quad e_1 \oplus (e_2 \oplus e_3) = (e_1 \oplus e_2) \oplus e_3 \quad (4.285)$$

$$\text{élément neutre} \quad e_1 \oplus 0 = 0 \oplus e_1 = e_1 \quad (4.286)$$

Exemple : pour un ensemble de pixels, cet opérateur permet de définir un « masque flou » $\Omega_{R \oplus P_2} = \Omega_{R_1} \oplus \Omega_{P_2}$ correspondant à la réunion floue des pixels vérifiant deux propriétés.

Opérateur ET ou t-norme

Une t-norme est un opérateur \otimes , défini de $[0,1]^2$ dans $[0,1]$, vérifiant les propriétés suivantes :

$$\text{commutativité} \quad e_1 \otimes e_2 = e_2 \otimes e_1 \quad (4.287)$$

$$\text{monotonie} \quad e_1 \geq e_3 \text{ et } e_2 \geq e_4 \Rightarrow e_1 \otimes e_2 \geq e_3 \otimes e_4 \quad (4.288)$$

$$\text{associativité} \quad e_1 \otimes (e_2 \otimes e_3) = (e_1 \otimes e_2) \otimes e_3 \quad (4.289)$$

$$\text{élément neutre} \quad e_1 \otimes 1 = 1 \otimes e_1 = e_1 \quad (4.290)$$

Exemple : pour un ensemble de pixels, cet opérateur permet de définir un masque flou $\Omega_{P_1 \otimes P_2} = \Omega_{P_1} \otimes \Omega_{P_2}$ correspondant à l'intersection floue des pixels vérifiant simultanément deux propriétés.

Opérateur NON

L'opérateur NON est défini de la façon suivante :

$$\begin{cases} [0,1] \rightarrow [0,1] \\ e \mapsto \bar{e} = 1 - e \end{cases} \quad (4.291)$$

Exemple : pour un ensemble de pixels, il permet de définir un masque flou $\overline{\Omega_p}$ correspondant aux pixels ne vérifiant pas une propriété.

La dualité de De Morgan permet d'associer une t-norme à une t-conorme et réciproquement, grâce aux relations suivantes :

$$e_1 \otimes e_2 = \overline{e_1 \oplus e_2} \quad (4.292)$$

$$e_1 \oplus e_2 = \overline{e_1 \otimes e_2} \quad (4.293)$$

Choix des opérateurs

La littérature fournit une multitude d'opérateurs flous vérifiant les propriétés des opérateurs OU et ET énoncées ci-dessus. J'ai retenu ceux fondés sur les concepts probabilistes :

$$\text{t-conorme probabiliste} \quad e_1 \oplus e_2 = e_1 + e_2 - e_1 e_2 \quad (4.294)$$

$$\text{t-norme probabiliste} \quad e_1 \otimes e_2 = e_1 e_2 \quad (4.295)$$

Si l'état e correspond à une probabilité, il nous est donc possible de traduire les règles logiques en termes de relations probabilistes.

Morphologie mathématique floue

En traitement d'images, il est également possible d'appliquer les concepts de la logique floue sur des ensembles de pixels pour définir des masques flous. Il est par exemple possible d'appliquer des érosions et des dilations floues, concepts qui n'ont pu être mis en œuvre dans ces travaux pour des raisons d'efficacité. En effet, les algorithmes ont été développés sous Matlab, où les outils disponibles ne permettaient pas de réaliser les opérations souhaitées dans des délais raisonnables.

Filtrage de masque flou

Les pixels vérifiant une propriété P forment un masque flou. L'appartenance d'un pixel à ce masque est déterminée par l'état flou de ce pixel pour cette propriété. Un filtrage peut être produit, par simple convolution par un filtre classique. En général, j'emploie le filtre suivant, de taille $L_x \times L_y$:

$$\frac{1}{L_x L_y} \begin{pmatrix} 1 & .. & 1 \\ .. & 1 & .. \\ 1 & .. & 1 \end{pmatrix} \quad (4.296)$$

4.3.1.4. Défuzzification

La défuzzification est le procédé qui permet de transformer un état flou en un état binaire. Cela consiste à effectuer un seuillage à la valeur 0,5.

Nous avons besoin de recourir à une défuzzification pour deux raisons :

- d'une part, pour la gestion des masques par le module de morphologie mathématique ;
- d'autre part, pour obtenir une classification finale, puisque nous choisirons la mise en œuvre de la reconstruction en fonction des objets reconnus.

4.3.2. Principes de base de la reconstruction d'objets

4.3.2.1. Objets recherchés

Objets d'intérêt

L'ensemble des travaux menés au préalable (*cf.* chapitres précédents) nous permet de savoir qu'un certain nombre d'éléments de l'image présentent des comportements spécifiques au radar et nécessitent donc des traitements spécifiques :

- les zones de repliement ;
- les zones d'ombre ;
- les coins réflecteurs ;
- les artéfacts de la synthèse radar ;
- les zones de végétation (diffusion volumique et pénétration possible de l'onde radar).

En outre, il peut être intéressant de reconnaître certains objets de la scène, afin d'effectuer une meilleure reconstruction par l'introduction de modèles et donc d'informations *a priori* :

- les bâtiments ;
- les structures urbaines de petites tailles (murets, palissades, etc.) ;
- les zones de goudron et de béton (sol de référence) ;
- les zones d'herbe (autre sol de référence) ;
- les objets isolés (voitures, panneaux, lampadaires).

Objets traités

Par manque de temps et de données adaptées, tous ces éléments des images ne sont pas traités à la hauteur de leurs possibilités, dans les travaux présentés dans ce chapitre :

- En raison de la faible différence de décalage spectral (*cf.* sous-paragraphe « Limitations » du paragraphe 3.2.2.1), l'information présente dans la zone de repliement est ignorée dans l'algorithme de reconstruction proposé.
- En outre, les artéfacts de synthèse ne sont que sommairement traités, et la richesse de la corrélation spatiale de phase n'a pas été employée.

- Enfin, les propriétés des coins réflecteurs ne sont que très superficiellement exploitées.

4.3.2.2. Algorithme global de reconstruction « 3D »

Principes de la reconstruction

La reconstruction « 3D » des éléments de la scène est fondée sur l'emploi de deux modèles d'objets :

- Le premier modèle est employé pour reconnaître l'occurrence d'un tel objet dans la scène. Le modèle est décrit à partir de règles floues basées sur l'information extraite de l'image. Cette information est au préalable fuzzifiée pour être employée.
- Le second modèle permet de définir la forme reconstruite à partir des informations associées à l'objet. Il est parfois identique au premier modèle.

L'image est donc traitée au préalable, afin d'extraire l'information nécessaire à cette analyse. Lorsqu'un objet est reconnu, l'image subit généralement de nouveaux traitements spécifiques aux propriétés de l'objet, afin d'extraire une information plus pertinente.

Les règles employées par les modèles sont relativement simples et logiques. Les règles purement empiriques ont été évitées afin d'obtenir un algorithme indépendant des propriétés spécifiques de la zone de test. Cependant, les règles pourraient être affinées à partir d'un jeu de données de test plus important, en employant des règles de Bayes.

Étapes de traitement

Les étapes de traitement pour la reconstruction sont les suivantes :

- traitement et extraction d'informations de l'image ;
- reconnaissance d'éléments de la scène ;
- nouveaux traitements et extraction d'informations de l'image ;
- reconnaissance d'objets dans la scène ;
- détermination de la forme « 2D » de l'objet d'après un modèle de forme ;
- détermination de la forme « 3D » de l'objet d'après un modèle de forme et les différentes informations extraites.

Il faut noter que j'ai délibérément choisi de traiter indépendamment le problème de la forme « 2D » et celui de la forme « 3D ». En effet, l'imprécision permanente sur la valeur de la phase interférométrique induit une erreur de localisation angulaire. Cela se traduit par une erreur de localisation au sol et donc une forme « 2D » projetée au sol de manière erronée. Or, la forme « 2D » observable dans l'image d'amplitude de la donnée radar est en revanche précise et plus facile à exploiter. Il est donc intéressant de d'abord rechercher la forme « 2D », pour corriger l'imprécision angulaire et donc la forme « 3D ».

4.3.3. Algorithme détaillé de reconstruction

4.3.3.1. Extraction d'information pixélique

Quantification floue radiométrique

La radiométrie est un bon indicateur de classification, en dépit du *speckle*. L'appartenance de chaque pixel à chacune des classes suivantes a été évaluée en premier lieu :

- ombre (modèle homographique $\Rightarrow \Omega_{\text{ombre}}$) ;
- béton/goudron (modèle polynomial $\Rightarrow \Omega_{\text{goudron}}$) ;
- herbe rase ou végétation rase (modèle polynomial $\Rightarrow \Omega_{\text{herbe}}$) ;

- végétation dense et haute (modèle polynomial $\Rightarrow \Omega_{\text{végétation}}$) ;
- structures urbaines (modèle homographique $\Rightarrow \Omega_{\text{structure}}$) ;
- points brillants (modèle homographique $\Rightarrow \Omega_{\text{brillant}}$) ;
- points très brillants, généralement des coins réflecteurs (modèle homographique $\Rightarrow \Omega_{\text{coins}}$).

Les données n'étant pas normalisées, les paramètres des fonctions d'appartenance ont été évalués empiriquement (par simple lecture de la radiométrie de quelques pixels échantillons) sur la même zone que la zone de test (extrait du quartier1), mais sans recherche méthodique de valeurs optimales.

Quantification floue de la cohérence

La cohérence est un bon indicateur de la qualité interférométrique. Sa dynamique est concentrée sur les fortes valeurs (proches de 1), pour les systèmes aéroportés ayant une faible ligne de base. La séparation des points cohérents ou non est donc réalisée sur une zone de transition courte. Le masque flou correspondant est obtenu grâce au modèle homographique 2 ($\Rightarrow \Omega_{\text{cohérent}}$).

Quantification floue des hauteurs relatives

L'interférogramme bruité permet de créer une quantification floue des hauteurs entre les éléments de faible hauteur (hauteur inférieure au mètre) et les éléments hauts (hauteur supérieure à la dizaine de mètres). Il n'est pas intéressant de faire de distinction plus fine des hauteurs au niveau pixélique, du fait de l'imprécision notable des hauteurs (même en tenant compte de la cohérence). En effet, les modèles employés doivent être suffisamment flous pour prendre en compte cette incertitude.

Ce calcul s'appuie sur une mesure relative des hauteurs par rapport au niveau du sol. Il nécessite donc un modèle d'altitude du niveau du sol. Les masques d'objets bas et hauts sont obtenus à partir des deux modèles homographiques ($\Rightarrow \Omega_{\text{bas}}, \Omega_{\text{haut}}$).

4.3.3.2. Reconnaissance d'éléments et extraction d'informations de plus haut niveau

Recherche de points d'altitude fiable

Il est nécessaire de trouver des points fiables pour le calcul de l'altitude. Nous devons donc ignorer :

- les points dont la radiométrie est trop faible car le bruit de phase est élevé ;
- les artéfacts dont la phase interférométrique ne revêt aucun sens (cf. paragraphe 2.2.2.5) ;
- les objets de petite taille qui viennent parasiter le modèle urbain d'élévation et compliquent la reconstruction ;
- les pixels qui n'appartiennent pas à l'objet dont nous souhaitons estimer précisément l'altitude.

Le masque flou des points de la zone d'ombre (Ω_{ombre}) est filtré pour inclure les petits objets qui sont probablement des artéfacts ($\Rightarrow \Omega_{\text{ombre2}}$). Un premier masque de points valides est produit à partir de l'intersection floue entre le masque des points cohérents et l'ensemble des points n'appartenant pas à la zone d'ombre ($\Rightarrow \Omega_{\text{valide}} = \Omega_{\text{cohérent}} \otimes \overline{\Omega_{\text{ombre2}}}$).

Reconstruction du niveau du sol

La reconstruction du niveau du sol est une étape primordiale de la reconstruction « 3D » en milieu urbain. Elle fournit une surface de référence qui permet de caractériser les autres éléments grâce à leur altitude et de résoudre bon nombre d'ambiguïtés. Je l'effectue en plusieurs étapes :

1. Lors de la première étape, un masque flou de points susceptibles d'appartenir au sol est produit. C'est la réunion floue des pixels d'herbe rase et des pixels de goudron/béton. Seuls les points valides sont considérés ($\Rightarrow \Omega_{\text{terrain}} = (\Omega_{\text{herbe}} \oplus \Omega_{\text{goudron}}) \otimes \Omega_{\text{valide}}$). Compte tenu de la faible taille de la zone de test, une mesure d'altitude moyenne est effectuée sur les points appartenant au masque. Chaque mesure de hauteur pixélique est pondérée par sa probabilité d'appartenance au masque flou Ω_{terrain} . L'erreur introduite par la moyenne sur la hauteur locale du sol n'aura pas de répercussion directe sur le niveau réel du sol finalement reconstruit, car cette hauteur moyenne du sol n'est employée que pour définir les niveaux d'altitudes faible ou élevée.
2. Dans une seconde étape, je considère que ce masque flou Ω_{terrain} inclut des pixels d'objets isolés d'altitude plus élevée que le niveau du sol. Je ne conserve donc plus que les points dont l'altitude est inférieure à cette altitude moyenne ($\Rightarrow \Omega_{\text{sol}}$). Une nouvelle altitude moyenne est évaluée sur ces nouveaux points.
3. Une première quantification floue des hauteurs relatives peut maintenant être réalisée grossièrement ($\Rightarrow \Omega_{\text{bas}}, \Omega_{\text{haut}}$) et un nouveau masque flou du sol est produit à partir de l'intersection floue des pixels d'herbe rase et de goudron/béton et des pixels de basse altitude ($\Rightarrow \Omega_{\text{sol2}} = (\Omega_{\text{terrain}} \oplus \Omega_{\text{bas}}) \otimes \Omega_{\text{valide}}$). Une altitude moyenne du sol est calculée.
4. Afin d'améliorer le résultat précédent, l'algorithme est appliqué de manière itérative. Un second passage par les étapes 2 et 3 permet d'obtenir des masques plus précis ($\Rightarrow \Omega_{\text{sol3}}, \Omega_{\text{bas2}}, \Omega_{\text{haut2}}, \Omega_{\text{sol4}}$).
5. Un masque filtré du sol ($\Rightarrow \Omega_{\text{forme_sol}}$) est produit, afin de construire une forme « 2D » fiable du sol.

Production d'un masque urbain

Je désigne par « masque urbain » le masque délimitant l'ensemble des constructions humaines d'altitudes relatives élevées. Je fais deux hypothèses sur la forme « 2D » de ce masque :

- il est composé de formes rectangulaires de grandes tailles ;
- il n'inclut généralement pas de végétation ;
- une ombre peut être associée à chaque « élément » du masque urbain.

Ces hypothèses sont bien entendu imprécises et justifient de nouveau pleinement l'usage de la logique floue.

Un premier masque urbain est produit à partir de l'intersection floue des points du type « structures urbaines » et des points d'altitude élevée ($\Rightarrow \Omega_{\text{urbain}} = \Omega_{\text{haut}} \otimes \Omega_{\text{structure}}$).

Ensuite, les ombres de petites étendues sont supprimées du masque flou des zones d'ombre (Ω_{ombre}). Le traitement est réalisé par érosion-dilatation sur le masque binarisé, puisque je ne disposais pas de moyens logiciels suffisants pour mettre en œuvre une morphologie mathématique floue ($\Rightarrow \Omega_{\text{ombre2}}$).

Le masque d'ombre est ensuite étendu, par dilatation uniquement, dans la direction de la distance, dans le sens des distances décroissantes (c'est-à-dire vers le radar). Le but est de

s'assurer que chaque « élément » du masque peut être associé à une zone d'ombre ($\Rightarrow \Omega_{\text{ombre_étendue}}$). La taille de la dilatation est donc en rapport avec la taille probable des constructions. Ce masque étendu est croisé avec le masque urbain ($\Rightarrow \Omega_{\text{urbain2}} = \Omega_{\text{ombre_étendue}} \otimes \Omega_{\text{structure}}$).

4.3.3.3. Reconnaissance d'objets et reconstruction « 2D »

Reconstruction « 2D » des bâtiments

Nous allons chercher à reconstruire les bâtiments à partir des coins réflecteurs du masque urbain ($\Rightarrow \Omega_{\text{ref_urbain}} = \Omega_{\text{urbain2}} \otimes \Omega_{\text{réflecteur}}$). Afin de nous assurer qu'il s'agit bien de constructions urbaines, nous retirons les points trop isolés pour éviter, par exemple, de confondre un arbre, au milieu duquel se trouve un lampadaire, avec un bâtiment. Nous obtenons un masque de points dont nous pouvons être sûrs qu'ils appartiennent à des constructions urbaines ($\Rightarrow \Omega_{\text{ref_urbain2}}$).

À partir de ces points, nous effectuons des croissances de régions que nous croisons avec le masque urbain. Nous obtenons un masque de bâtiments ($\Rightarrow \Omega_{\text{bâtiment}}$, binaire en l'occurrence, puisque les traitements morphologiques sont binaires).

Nous cherchons maintenant à reconstruire la forme « 2D ». Pour ce faire, les masques de bâtiment sont rendus plus rectangulaires et les trous sont comblés par des traitements morphologiques (toujours binaires), conformément aux hypothèses ($\Rightarrow \Omega_{\text{bâtiment2}}$).

Les formes « 2D » des autres masques restant à produire sont tirées du masque conjugué de celui des bâtiments ($\Rightarrow \Omega_{\text{reste}} = \overline{\Omega_{\text{bâtiment2}}}$).

Reconstruction « 2D » des arbres

Une érosion-dilatation est employée sur le masque de végétation filtré, afin de ne garder que les zones de végétation étendues ($\Rightarrow \Omega_{\text{végétation2}}$, pour ne garder que les gros arbres et éliminer les arbustes). Le masque flou des arbres est construit à partir de l'intersection du masque flou de végétation et du masque flou des éléments hauts ($\Rightarrow \Omega_{\text{arbre}} = \Omega_{\text{végétation2}} \otimes \Omega_{\text{haut2}} \otimes \Omega_{\text{reste}}$).

Les formes « 2D » des autres masques restants sont tirées du masque conjugué ($\Rightarrow \Omega_{\text{reste2}} = \Omega_{\text{reste}} \otimes \overline{\Omega_{\text{arbre}}}$).

Reconstruction « 2D » des structures urbaines restantes

Les structures urbaines restantes sont constituées des pixels de forte radiométrie qui appartiennent au masque ($\Rightarrow \Omega_{\text{structure2}} = \Omega_{\text{reste2}} \otimes \Omega_{\text{brillant}} \otimes \Omega_{\text{valide}}$). Un filtrage, ainsi qu'une série de dilatations-érosions, permettent d'améliorer la forme « 2D » du masque ($\Rightarrow \Omega_{\text{structure3}}$).

De nouveau, les formes « 2D » des autres masques restants sont tirées du masque conjugué ($\Rightarrow \Omega_{\text{reste4}} = \Omega_{\text{reste3}} \otimes \overline{\Omega_{\text{structure3}}}$).

Reconstruction « 2D » des zones herbeuses

Je considère comme « zones herbeuses » les points de basse altitude et de radiométrie proche de celle de l'herbe ($\Rightarrow \Omega_{\text{herbe2}} = \Omega_{\text{reste4}} \otimes \Omega_{\text{herbe}} \otimes \Omega_{\text{bas}}$). Nous pouvons faire l'hypothèse qu'une zone herbeuse ne contient pas de zones de goudron/béton isolées. Les masques de zones herbeuses devront donc contenir très peu de trous. Une série de traitements

morphologiques et de filtrages permet d'améliorer la forme « 2D ». Il faut cependant veiller à ne prendre en compte que des pixels qui n'ont pas déjà été inclus dans d'autres masques de reconstruction « 2D » ($\Rightarrow \Omega_{\text{herbe3}}$).

Comme précédemment, les formes « 2D » des autres masques restants sont tirées du masque conjugué ($\Rightarrow \Omega_{\text{reste5}} = \Omega_{\text{reste4}} \otimes \overline{\Omega_{\text{herbe3}}}$).

Reconstruction « 2D » des zones de goudron/béton

Les zones de goudron/béton sont constituées des points restants qui ont la radiométrie du goudron/béton et une altitude faible ($\Rightarrow \Omega_{\text{goudron2}} = \Omega_{\text{reste5}} \otimes \Omega_{\text{goudron}} \otimes \Omega_{\text{bas}}$). Une série de traitements morphologiques améliore la forme « 2D » finale ($\Rightarrow \Omega_{\text{goudron3}}$).

Les pixels non affectés à ce dernier masque définissent un ensemble de pixels où l'information est invalide et non utilisable ($\Rightarrow \Omega_{\text{invalide}} = \Omega_{\text{reste5}} \otimes \overline{\Omega_{\text{goudron3}}}$).

4.3.3.4. Reconstruction « 3D »

Nous disposons maintenant de la connaissance de la nature des objets et de leur forme « 2D ». Les modèles numériques d'élévation peuvent être corrigés en fonction de la nature des objets.

Les élévations des objets de la végétation sont faiblement filtrées, en raison de la forte rugosité de ces types de surfaces. Les élévations des bâtiments sont filtrées par un filtre médian, qui permet de conserver efficacement les contours. Des filtres très larges sont utilisés pour régulariser les surfaces planes comme celles associées au goudron ou celles associées à l'herbe rase.

Il faut noter que les filtres d'élévation employés prennent en compte la plupart des mesures d'élévation. Les résultats peuvent donc être encore fortement améliorés, en tenant compte de manière plus efficace des mesures les plus fiables et de la nature des coins réflecteurs.

4.3.4. Exemple de reconstruction

4.3.4.1. Classification des éléments de la scène

Ce paragraphe présente le résultat de la classification (cf. figure 4-16) obtenue pour la scène associée à l'image représentée sur la figure 4-11. Les photos prises sur le terrain confirment la justesse de la classification. Les zones de goudron/béton ont été relativement bien classifiées, cependant leurs formes « 2D » sont mal délimitées. Certaines structures urbaines n'ont pu être identifiées car elles ne correspondaient à aucun des modèles spécifiés. Notamment, plusieurs murets séparateurs peuvent être reconnus sur la classification. Ils sont cependant discontinus car ils n'ont pu être modélisés et régularisés.

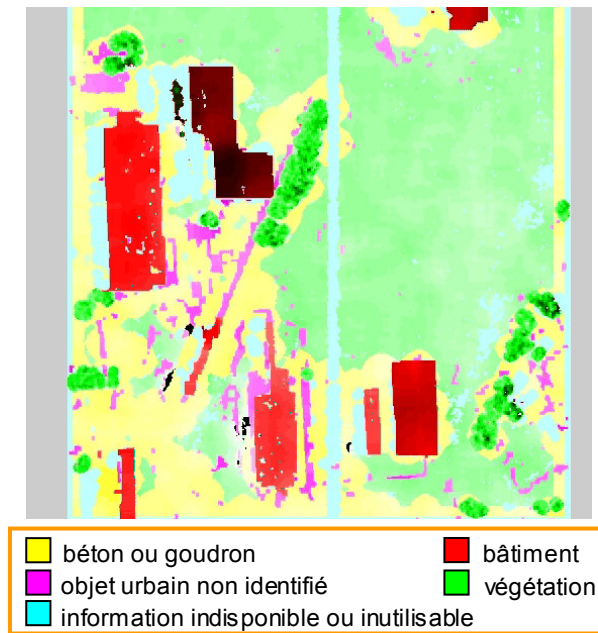


FIGURE 4-16. Exemple de classification des éléments de la scène (cf. figure 4-11) obtenue à partir de la classification floue (extrait du quartier1).

4.3.4.2. Reconstruction « 3D »

Nous ne disposons malheureusement pas de Modèle Numérique d'Élévation du quartier pour valider ces résultats. En outre, la reconstruction proposée n'a pas été transposée dans la géométrie d'un référentiel géographique, elle a été effectuée en géométrie radar. Cela signifie qu'une translation en distance (c'est-à-dire en s'éloignant du radar) doit être effectuée pour les objets de haute altitude. Les problèmes de localisation « 2D » précise n'ont pas été abordés dans le cadre de cette étude.

La figure 4-17 présente la reconstruction obtenue sur le quartier1 par la méthode de reconstruction « 3D » proposée (cf. paragraphe 4.3.3). Les photos prises sur le terrain confirment l'exactitude de la forme « 3D » (cf. panorama 4-18). Cette évaluation qualitative mériterait cependant des mesures plus précises sur le terrain.

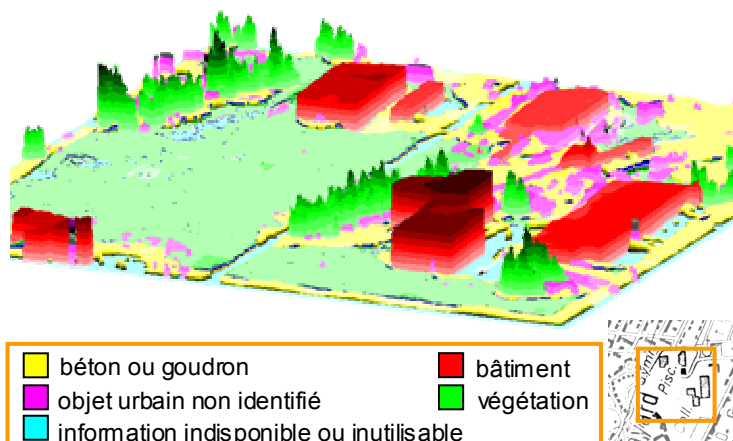


FIGURE 4-17. Exemple de reconstruction « 3D » optimisée de la zone semi-urbaine (cf. figure 4-11, extrait du quartier1) obtenue à partir de la classification présentée sur la figure 4-16.



FIGURE 4-18. *Panorama de photographies de la zone d'étude (extrait du quartier1).*

4.4 Conclusions

Les résultats présentés dans ce chapitre soulignent de manière manifeste l'intérêt de l'utilisation conjointe d'une modélisation objet et de sources multiples de mesures (issues du traitement du signal complexe voire fréquentiel, et de traitements propres à l'image en général) pour la reconstruction du « 3D ». Cette réflexion peut sembler anodine au premier abord, mais les résultats présentés montrent le caractère réellement complémentaire des informations interférométriques et de celles extraites d'une image seule.

Les bases de la logique floue s'accommodent aisément des problèmes rencontrés en radar (*speckle*, imprécision interférométrique...) pour la reconstruction du « 3D ». Une partie de la difficulté est reportée sur le choix des modèles de quantification floue et de leurs paramètres. Cependant, ces modèles peuvent être alimentés à l'aide de mesures statistiques tirées de données réelles.

Les règles et traitements présentés dans ce chapitre peuvent être encore très largement améliorés. En outre, l'analyse des résultats nécessiterait le recours à des validations plus conséquentes : Modèle Numérique d'Élévation obtenu par un autre système (optique, LIDAR...), vérité terrain plus riche, etc.

Conclusions et perspectives

Les travaux présentés dans le cadre de cette thèse ont suivi une démarche graduelle :

- Une définition des postulats interférométriques et une présentation de leurs limitations ont été réalisées.
- Une modélisation du comportement de la phase en haute résolution, dans le but de vérifier le caractère applicable du principe même de la technique interférométrique, a été effectuée.
- L'approche « signal » a été poursuivie afin d'étudier le comportement de la phase interférométrique et les possibilités de reconstruction « 3D » dans les zones de repliement.
- Ensuite, une approche « image » et « modélisation objet » a permis d'aborder la question de la reconstruction « 3D » d'une manière plus optimale.

Ces travaux ont conduit :

- au développement d'un simulateur d'images radar et d'interférogrammes radar ;
- à l'énoncé de postulats interférométriques permettant de servir de base aux techniques développées ;
- à une nouvelle démonstration du principe du décalage spectral ;
- à la découverte d'un comportement spécifique de la phase en haute résolution et à son étude sur des données réelles et des simulations ;
- à la proposition d'un modèle du comportement de la phase en haute résolution (extension du modèle de Goodman) et à son étude dans différentes configurations paramétriques ;
- à la définition d'estimateurs de la corrélation spatiale de la phase qui fournissent une nouvelle source d'information sur la qualité interférométrique (ou sur la qualité de la synthèse radar) ;
- à la mise en évidence du rôle crucial des modèles de phase dans les calculs de cohérence interférométrique ou de corrélation spatiale de la phase ;
- à la proposition d'une technique de calcul interférométrique et de calcul de la cohérence (appelées respectivement « interférométrie de pente » et « cohérence de pente ») pour améliorer la qualité interférométrique, notamment dans les zones de repliement ;
- à l'étude d'une technique de détection des repliements par analyse du décalage fréquentiel (qui a été validée sur des images simulées) ;
- à la définition d'une méthode de reconstruction du « 3D » par interférométrie de pente (RIP 2D) dans les zones de repliement (qui a été validée sur des images simulées) ;
- au développement d'une méthode de reconstruction « 3D » par logique floue sur des images réelles.

Enfin, cette expérience m'a permis d'acquérir des connaissances et un savoir-faire que j'ai le privilège de pouvoir mettre en pratique dans mes nouvelles activités au sein de l'industrie.

Certains de ces travaux n'ont pu être approfondis en raison de la non disponibilité de données de validation et pourront donc être poursuivis au moment où ces données seront disponibles (interférométrie de pente, RIP 2D...).

De nombreux problèmes théoriques qui ont été soulevés dans cette thèse ouvrent de nouvelles perspectives de recherche :

- L'impact de la technique de synthèse radar sur la phase interférométrique pour la reconstruction du « 3D » doit être évalué plus précisément.

- La définition de la résolution spatiale interférométrique reste à donner : en effet, les travaux portant sur la corrélation spatiale de la phase ou sur l'interférométrie de pente ont souligné le comportement spécifique de celle-ci vis-à-vis de la définition de la résolution spatiale radiométrique.
- Les modèles de quantification floue pourraient se fonder sur le comportement statistique du signal, notamment dans le cas de la radiométrie, en prenant en compte la statistique du *speckle*.
- Les règles de reconstruction « 3D » pourraient être affinées en exploitant plus efficacement la localisation précise des coins réflecteurs, en utilisant les principes des règles bayésiennes et éventuellement d'autres sources d'information (par exemple, la corrélation spatiale de la phase).

5. Annexes

Vous trouverez dans ces annexes une définition des principales grandeurs utilisées dans ce document, une brève description du fonctionnement du module de simulation d'images radar et d'interférogrammes intégré au logiciel 2SIR ainsi qu'un développement complet de certains calculs présentés succinctement dans les chapitres précédents.

5.1 Radiométrie et équation radar

5.1.1. Grandeurs radiométriques

5.1.1.1. Flux énergétique Φ

Définition

Énergie par unité de temps.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (W) \quad (5.297)$$

Synonyme

Puissance.

5.1.1.2. Densité de flux énergétique F

Définition

Flux traversant une unité de surface dS

$$F = \frac{d\Phi}{dS} \quad (W.m^{-2}) \quad (5.298)$$

Synonymes

Densité de puissance, éclairement, émittance, exitance.

Remarque :

Lorsque la surface n'est pas précisée, la densité de flux énergétique désigne le flux par unité de surface dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation, que nous noterons F_{\perp} .

5.1.1.3. Intensité d'une source ponctuelle I

Définition

Flux traversant un angle solide.

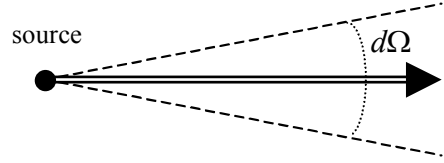
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (W.sr^{-1}) \quad (5.299)$$


FIGURE 5-1. Intensité d'une source ponctuelle.

5.1.1.4. Luminance énergétique L

Définition

Flux par unité de surface ds , projection de la surface dS de la source dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation, se propageant dans un angle solide $d\Omega$.

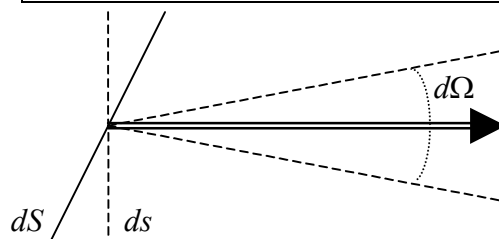
$$L = \frac{d^2\Phi}{ds d\Omega} = \frac{d^2\Phi}{dS \cos\theta d\Omega} = \frac{dF}{\cos\theta d\Omega} \quad (W.m^{-2}.sr^{-1}) \quad (5.300)$$


FIGURE 5-2. Luminance énergétique.

5.1.1.5. Angle solide $d\Omega$

Définition

$$d\Omega = \frac{ds}{R^2} = \frac{dS \cos\theta}{R^2} \quad (sr) \quad (5.301)$$

Autre relation

$$ds = (R \sin\theta d\phi)(R d\theta) = R^2 d\Omega \quad (5.302)$$

5.1.1.6. Section équivalente radar σ_{pq}

Définition

Surface équivalente de la cible dans le plan perpendiculaire à l'onde, si nous supposons qu'elle renvoie l'intégralité du flux de manière isotrope dans l'espace.

$$\sigma_{pq} = \lim_{R \rightarrow \infty} \left(4\pi R^2 \frac{F_{\perp d,p}(\theta, \phi, R)}{F_{\perp i,q}} \right) \quad (m^2) \quad (5.303)$$

$F_{\perp d,p}(\theta, \phi, R)$ est la densité de puissance renvoyée par la cible sur la sphère de rayon R dans la direction (θ, ϕ) , pour la polarisation p (H ou V pour Horizontale ou Verticale).

$F_{\perp i, q}$ est la densité de puissance reçue au niveau de la cible dans le plan perpendiculaire à l'onde, pour la polarisation q (H ou V).

σ_{pq} est la surface équivalente radar pour le type de polarisation (p, q) .

Explication

Nous supprimons les indices de polarisation afin de simplifier l'écriture.

Considérons une cible qui reçoit un flux énergétique Φ_i de densité $F_{\perp i}$ localement uniforme. Si la cible est sphérique et présente une surface apparente σ_{cible} , alors $\Phi_i = \sigma_{\text{cible}} F_{\perp i}$. Si la cible diffuse l'intégralité du flux de manière isotrope, alors à une distance R , la densité de flux $F_{\perp d}$ est telle que $F_{\perp d} = \frac{\Phi_i}{4\pi R^2} = \frac{\sigma_{\text{cible}} F_{\perp i}}{4\pi R^2}$. D'où $\sigma_{\text{cible}} = 4\pi R^2 \frac{F_{\perp d}}{F_{\perp i}}$ et la définition (5.303) de la section équivalente radar.

Approximation

La distance d'observation est généralement suffisamment grande pour que nous puissions faire l'approximation suivante :

$$\sigma_{\text{cible}} = 4\pi R^2 \frac{F_{\perp d}(\theta, \phi, R)}{F_{\perp i}} \quad (5.304)$$

5.1.1.7. Coefficient de rétrodiffusion σ_{0pq}

Définition

C'est le rapport entre la surface équivalente radar σ_{pq} et la surface réelle S , pour une surface étendue.

$$\sigma_{0pq} = \frac{\sigma_{pq}}{S} \quad (\text{sans dimension}) \quad (5.305)$$

Remarque :

Si la surface réelle n'est pas connue, elle est remplacée par la surface de la facette associée aux pas de pixel pour un sol plat ou pour une déclivité donnée, si un MNT est disponible.

Le coefficient de rétrodiffusion est équivalent au rapport entre l'énergie renvoyée par le réflecteur et celle renvoyée par une sphère parfaitement diffusante de section égale à la surface du réflecteur.

Autres formulations

La formulation en décibels est souvent préférée :

$$\sigma_{0pq} (dB) = 10 \log(\sigma_{0pq}) \quad (dB) \quad (5.306)$$

Ainsi, un coefficient de rétrodiffusion de zéro décibel signifie que le rapport a pour valeur l'unité, et donc que la surface équivalente est identique à la surface réelle de la cible. Cela signifie que sous cet angle d'observation, la cible semble rayonner toute l'énergie de manière isotrope.

Autre définition

Il est patent que la surface équivalente radar varie en fonction de l'angle local d'incidence θ . Afin de se libérer de ces variations dues à des considérations purement géométriques, un autre coefficient de rétrodiffusion est généralement défini. Pour éviter toute confusion, celui-ci est noté différemment :

$$\gamma_{pq} = \frac{\sigma_{pq}}{S} = \frac{\sigma_{pq}}{S \cos(\theta)} \quad (5.307)$$

5.1.1.8. Fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle

Définition

C'est le rapport entre la luminance dL_d diffusée par une surface supposée horizontale et plane qui reçoit un éclaircissement dF_i produit par un flux de longueur d'onde λ , de luminance L_i et parvenant sous un angle d'incidence θ_i dans un angle solide infiniment petit $d\Omega_i$:

$$\boxed{\text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = \frac{dL_d(\theta_d, \phi_d, \lambda)}{dF_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)} = \frac{dL_d(\theta_d, \phi_d, \lambda)}{L_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) d\Omega_i \cos(\theta_i)}} \quad (\text{sr}^{-1}) \quad (5.308)$$

Définition liée

La réflectance hémisphérique ou albédo total représente la part totale d'énergie renvoyée par la surface dans toutes les directions.

$$\boxed{\rho_0 = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} [L_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos(\theta_i) \sin(\theta_i) I_1(\theta_i, \phi_i, \lambda)] d\theta_i d\phi_i}{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} L_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos(\theta_i) \sin(\theta_i) d\theta_i d\phi_i}} \quad (\text{sans dimension}) \quad (5.309)$$

avec :

$$I_1(\theta_i, \phi_i, \lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) \cos(\theta_d) \sin(\theta_d) d\theta_d d\phi_d \quad (5.310)$$

Cas de la surface lambertienne

Une surface lambertienne est une surface diffusante idéale. La luminance renvoyée est proportionnelle à l'éclaircissement, quelle que soit la direction d'observation. La fonction de distribution de la réflectance est isotrope, elle donc reliée à la réflectance hémisphérique ρ_0 :

$$\boxed{\text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = \frac{\rho_0}{2\pi}} \quad (5.311)$$

Cas de la surface lisse réfléchissante

La surface est parfaitement réfléchissante et toute l'énergie réfléchi (portion déterminée par le coefficient de Fresnel $R(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda)$) est renvoyée dans la direction dite « spéculaire » (symétrique de la direction d'incidence par rapport à la normale à la surface) :

$$\boxed{\text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = R(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) \frac{\delta(\theta_d - \theta_i) \delta(\phi_d - \phi_i)}{\cos(\theta_d) \sin(\theta_d)}} \quad (5.312)$$

Remarque :

La FDRB est très peu usitée en radar, puisque les radars émetteur et récepteur observent pratiquement toujours la scène sous les mêmes angles. Nous n'avons donc accès qu'à sa valeur dans la direction de rétrodiffusion : $\text{FDRB}(\theta_i, \theta_i, \phi_i, \phi_i, \lambda)$. Nous pouvons définir le lien entre coefficient de rétrodiffusion et FDRB pour des angles quelconques, bien que le premier ne soit normalement utilisé que pour des angles d'incidence et de diffusion proches :

$$\text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = \frac{dL_d(\theta_d, \phi_d, \lambda)}{dF_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)} \quad (5.313)$$

$$\sigma_0(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = \lim_{R_d \rightarrow \infty} \frac{4\pi R_d^2}{S} \frac{dF_{\perp d}(\theta_d, \phi_d, R_d, \lambda)}{dF_{\perp i}(\theta_i, \phi_i, \lambda)} \quad (5.314)$$

$$\text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = \frac{d^3 \Phi_d(\theta_d, \phi_d, \lambda)}{ds d\Omega_d} \frac{1}{dF_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)} \quad (5.315)$$

$$\text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = \frac{d^3 \Phi_d(\theta_d, \phi_d, \lambda)}{ds} \frac{R_d^2}{s_d} \frac{1}{dF_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)} \quad (5.316)$$

$$\text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = \frac{d^2 F_{\perp d}(\theta_d, \phi_d, \lambda)}{dF_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)} \frac{R_d^2}{ds} \quad (5.317)$$

$$\text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = \frac{d^2 F_{\perp d}(\theta_d, \phi_d, \lambda)}{dF_{\perp i}(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos(\theta_i)} \frac{R_d^2}{ds} \quad (5.318)$$

Si la surface est suffisamment petite :

$$\text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = \sigma(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) \frac{1}{4\pi s \cos(\theta_i)} \quad (5.319)$$

$$\text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = \sigma_0(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) \frac{1}{4\pi \cos(\theta_i) \cos(\theta_d)} \quad (5.320)$$

Soit :

$$\sigma(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = 4\pi s \cos(\theta_i) \cos(\theta_d) \text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) \quad (5.321)$$

$$\boxed{\sigma_0(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = 4\pi \cos(\theta_i) \cos(\theta_d) \text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda)} \quad (5.322)$$

L'expression est encore plus simple avec le second type de coefficient de rétrodiffusion :

$$\gamma(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) = 4\pi \cos(\theta_i) \text{FDRB}(\theta_i, \theta_d, \phi_i, \phi_d, \lambda) \quad (5.323)$$

5.1.2. Grandeurs associées aux antennes

5.1.2.1. Ouverture plane

Définition

C'est un circuit soumis à un champ électrique défini par $\vec{E}_o(x, y)$. Le circuit rayonne un champ électromagnétique, essentiellement dans la direction privilégiée de l'axe z .

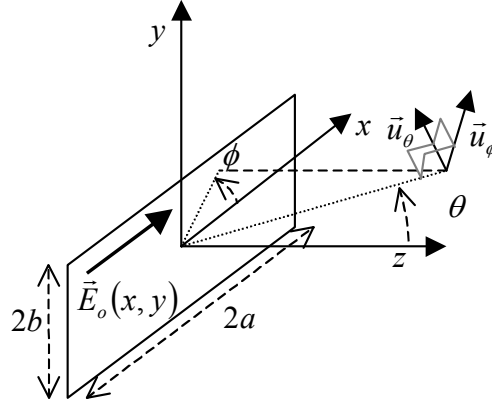


FIGURE 5-3. Exemple d'ouverture plane rectangulaire.

Approximation

Les solutions des équations de Maxwell à grande distance sont de la forme :

$$\vec{E}(R, \theta, \phi) = \underline{j}k_0 \frac{e^{-jk_0 R}}{2\pi R} [\vec{u}_\theta (f_x \cos \phi + f_y \sin \phi) + \vec{u}_\phi \cos \theta (f_y \cos \phi - f_x \sin \phi)] \quad (5.324)$$

Cette expression correspond à un champ transversal et f_x et f_y sont définis par :

$$f_x \vec{x} + f_y \vec{y} = \iint_{\text{ouverture}} \vec{E}_o(x, y) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (5.325)$$

où $k_x = k_0 \sin \theta \cos \phi$, $k_y = k_0 \sin \theta \sin \phi$ et $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Ouverture rectangulaire soumise à un champ constant

Si l'ouverture est rectangulaire et que le champ est maintenu constant sur toute l'ouverture plane, alors :

- dans le plan $\phi = 0$:

$$\vec{E} = \underline{j}k_0 E_0 4ab \frac{e^{-jk_0 R}}{2\pi R} \frac{\sin(k_0 a \sin \theta \cos \phi)}{k_0 a \sin \theta \cos \phi} \frac{\sin(k_0 b \sin \theta \sin \phi)}{k_0 b \sin \theta \sin \phi} [\vec{u}_\theta \cos \phi - \vec{u}_\phi \cos \theta \sin \phi] \quad (5.326)$$

- hors du plan $\phi = 0$:

$$\vec{E} = \underline{j}k_0 E_0 4ab \frac{e^{-jk_0 R}}{2\pi R} \frac{\sin(k_0 a \sin \theta)}{k_0 a \sin \theta} [\vec{u}_\theta] \quad (5.327)$$

5.1.2.2. Efficacité d'antenne η

Définition

Rapport entre la puissance émise Φ_e et la puissance fournie à l'antenne Φ_t :

$$\boxed{\eta = \frac{\Phi_e}{\Phi_t}} \quad (\text{sans dimension}) \quad (5.328)$$

Autres formulations

Nous pouvons exprimer la puissance Φ_m mesurée, lorsque l'antenne reçoit une densité de puissance $F_{\perp r}$, en fonction de la surface S de l'antenne :

$$\Phi_m = \eta \Phi_r = \eta S F_{\perp r} \quad (5.329)$$

5.1.2.3. Gain d'antenne G

Définition

Rapport entre la densité de puissance émise $F_{\perp e}(\theta, \phi, R)$ à la distance R infinie, dans une direction (θ, ϕ) , et la densité de puissance $F_{\perp ei}$ qui serait rayonnée par une antenne isotrope sans pertes :

$$G(\theta, \phi) = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{F_{\perp e}(\theta, \phi, R)}{F_{\perp ei}(R)} \quad (\text{sans dimension}) \quad (5.330)$$

Autres formulations

Si Φ_t est la puissance fournie à l'antenne, pour une antenne isotrope sans pertes, nous avons :

$$F_{\perp ei}(R) = \frac{\Phi_t}{4\pi R^2} \quad (5.331)$$

Ce qui nous permet de déduire :

$$G(\theta, \phi) = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{F_{\perp e}(\theta, \phi, R)}{\Phi_t} \quad (5.332)$$

$$G(\theta, \phi) = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \eta \frac{F_{\perp e}(\theta, \phi, R)}{\Phi_e} \quad (5.333)$$

$$G(\theta, \phi) = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi \eta \frac{F_{\perp e}(\theta, \phi, R)}{\int_{4\pi} F_{\perp e}(\theta_u, \phi_u, R) d\Omega_u} \quad (5.334)$$

puisque :

$$\Phi_e = \int_{4\pi} F_{\perp e}(\theta_u, \phi_u, R) R^2 d\Omega_u \quad (5.335)$$

Approximation lorsque R est grand

Lorsque R est grand, nous pouvons approcher la densité de puissance rayonnée $F_{\perp e}(\theta, \phi, R)$, en fonction de la puissance transmise Φ_t à l'antenne, de la façon suivante :

$$F_{\perp e}(\theta, \phi, R) = \Phi_t \frac{G(\theta, \phi)}{4\pi R^2} \quad (5.336)$$

5.1.2.4. Directivité d'antenne D

Définition

Rapport entre la densité de puissance émise $F_{\perp e}(\theta, \phi, R)$ à la distance R infinie, dans une direction (θ, ϕ) , et la moyenne de la densité de puissance émise ($\Phi_e / 4\pi R^2$) :

$$D(\theta, \phi) = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi \frac{F_{\perp e}(\theta, \phi, R)}{\int_{4\pi} F_{\perp e}(\theta_u, \phi_u, R) d\Omega_u} \quad (\text{sans dimension}) \quad (5.337)$$

Remarque :

$$G(\theta, \phi) = \eta D(\theta, \phi) \quad (5.338)$$

5.1.2.5. Surface effective d'antenne σ_A

Définition

Surface équivalente σ_A de l'antenne, compte tenu de son efficacité η par rapport à sa surface réelle S_A :

$$\sigma_A = \eta S_A \quad (m^2) \quad (5.339)$$

Explication

En se plaçant dans le cadre de l'ouverture plane rectangulaire, soumise à un champ constant, et en utilisant l'inégalité de Schwartz, nous pouvons montrer que :

$$D(\theta, \phi) \leq \frac{4\pi S_A}{\lambda^2} \quad (5.340)$$

Dans le cas le plus favorable (proche de l'axe d'éclairement de l'antenne), nous pouvons approcher la surface effective d'antenne :

$$\sigma_A(\theta, \phi) \approx \eta \lambda^2 \frac{D(\theta, \phi)}{4\pi} = \lambda^2 \frac{G(\theta, \phi)}{4\pi} \quad (5.341)$$

Remarque :

L'efficacité d'antenne peut donc être assimilée à une grandeur de type coefficient de rétrodiffusion, puisque c'est le rapport entre une surface équivalente et une surface réelle.

5.1.2.6. Diagramme de rayonnement F_N

Définition

Rapport entre la densité de puissance émise $F_{\perp e}(\theta, \phi, R)$, à la distance R infinie dans une direction (θ, ϕ) , et le maximum de densité de puissance émise :

$$F_N(\theta, \phi) = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{F_{\perp e}(\theta, \phi, R)}{\max[F_{\perp e}(\theta_u, \phi_u, R)]} \quad (\text{sans dimension}) \quad (5.342)$$

5.1.2.7. Lobes d'antenne

Définition

Zone du diagramme de rayonnement autour d'un maximum local. Le lobe dont le maximum associé a pour valeur 1 est appelé « lobe principal ». Les lobes latéraux à celui-ci sont appelés lobes secondaires.

Exemple

Voici un exemple de diagramme de rayonnement, basé sur le modèle de l'ouverture plane (cas d'un circuit rectangulaire sous un champ électrique constant). L'échelle utilisée est le décibel. Nous remarquons que le premier lobe secondaire est à $-13dB$.

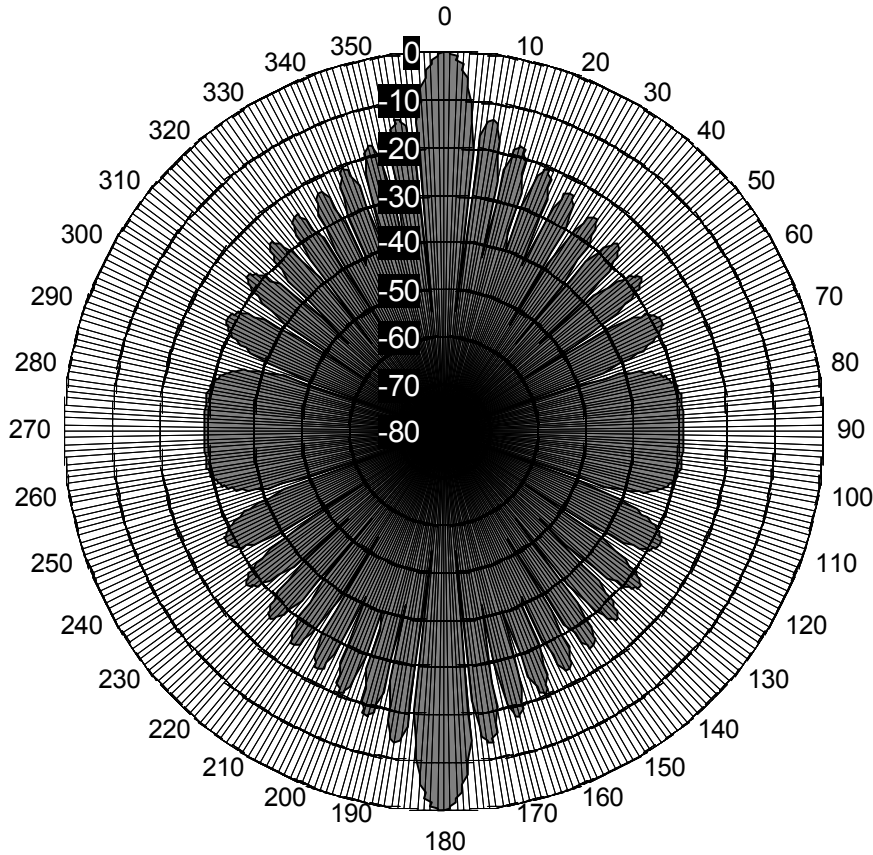


FIGURE 5-4. Diagramme de rayonnement d'une ouverture plane en fonction de θ , dans le plan $\phi = 0$.

5.1.2.8. Ouverture angulaire Θ d'une antenne**Définition**

Dans un plan donné, c'est la largeur angulaire du lobe principal délimité par les niveaux à $-3dB$ (approximativement la moitié de la puissance maximale : 0,501) du diagramme de rayonnement, dans ce même plan.

Exemple

Dans le cas de l'ouverture plane rectangulaire soumise à un champ électrique constant, nous pouvons utiliser l'expression du champ pour le plan $\phi = 0$:

$$\vec{E} = jk_0 E_0 4ab \frac{e^{-jk_0 R}}{2\pi R} \frac{\sin(k_0 a \sin \theta)}{k_0 a \sin \theta} [\vec{u}_\theta] \quad (5.343)$$

ce qui permet d'écrire, pour l'ouverture angulaire Θ de l'antenne dans ce plan :

$$10 \log \left(\left(\frac{\sin(k_0 a \sin \Theta/2)}{k_0 a \sin \Theta/2} \right)^2 \right) = -3 \Rightarrow \frac{\sin(k_0 a \sin \Theta/2)}{k_0 a \sin \Theta/2} = 10^{-3/20} \quad (5.344)$$

d'où l'expression de l'ouverture angulaire :

$$\Theta = 2 \operatorname{Arcsin} \left(\frac{\lambda C_{-3dB}}{2\pi a} \right) \quad (5.345)$$

où C_{-3dB} est solution de :

$$\frac{\sin(C_{-3dB})}{C_{-3dB}} = 10^{-3/20} \quad (5.346)$$

Numériquement :

$$C_{-3dB} = 1,38934858394 \quad (5.347)$$

Comme normalement $a \gg \lambda$, nous pouvons faire l'approximation suivante :

$$\Theta \approx \frac{C_{-3dB}}{\pi} \frac{\lambda}{a} \approx 0,4422 \frac{\lambda}{a} \quad (5.348)$$

5.1.3. Équation radar

5.1.3.1. Puissance renvoyée par une cible

Nous considérons un système de deux antennes. Une antenne a de gain G_a émet une onde monochromatique polarisée p dans une direction (θ_a, ϕ_a) . Cette onde est renvoyée par une cible de surface équivalente radar σ dans la direction (θ_b, ϕ_b) de la seconde antenne b de gain G_b .

Les distances antenne-cible R_a et cible-capteur R_b autorisent l'emploi des approximations précédentes :

$$F_{\perp e}(\theta_a, \phi_a, R_a) = \Phi_t \frac{G_a(\theta_a, \phi_a)}{4\pi R_a^2} \quad (5.349)$$

$$\sigma_{\text{cible}} = 4\pi R_b^2 \frac{F_{\perp d}(\theta_b, \phi_b, R_b)}{F_{\perp i}} \quad (5.350)$$

La densité de puissance $F_{\perp i}$ reçue au niveau de la cible, dans le plan perpendiculaire à l'onde, à la distance R_a de l'antenne émettrice, est :

$$F_{\perp i} = F_{\perp e}(\theta_a, \phi_a, R_a) \quad (5.351)$$

La densité de puissance S_c reçue au niveau de l'antenne réceptrice est :

$$F_{\perp r}(\theta_b, \phi_b, R_b, S_i) = F_{\perp d}(\theta_b, \phi_b, R_b, S_i) \quad (5.352)$$

Or la puissance Φ_m s'exprime en fonction de cette densité de puissance :

$$\Phi_m = \eta S F_{\perp r} = \sigma_A F_{\perp r} \quad (5.353)$$

La puissance ϕ_m mesurée par le capteur est donc :

$$\Phi_m(\theta_a, \phi_a, R_a, \theta_b, \phi_b, R_b) = \sigma_A(\theta_b, \phi_b) \frac{\sigma_{\text{cible}}}{4\pi R_b^2} \Phi_t \frac{G_a(\theta_a, \phi_a)}{4\pi R_a^2} \quad (5.354)$$

$$\boxed{\Phi_m(\theta_a, \phi_a, R_a, \theta_b, \phi_b, R_b) = \Phi_t \frac{\lambda^2 G_b(\theta_b, \phi_b)}{4\pi} \frac{\sigma_{\text{cible}}}{4\pi R_b^2} \frac{G_a(\theta_a, \phi_a)}{4\pi R_a^2}} \quad (5.355)$$

5.1.3.2. Caractéristiques d'un pixel en fonction des angles de pente

Coordonnées des points associés à la facette

La facette correspondant au pixel, en géométrie radar, est un plan orthogonal limité en azimut par deux plans verticaux (par rapport au repère (OXYZ), cf. figure 5-5) distants de δ_a et par deux plans orthogonaux à \vec{Z}_R distants de δ_d .

Les matrices de transfert entre les repères \mathfrak{R} (OXYZ), \mathfrak{R}' (OX'Y'Z'), \mathfrak{R}'' (OX''Y''Z'') et \mathfrak{R}_R (OX_RY_RZ_R) sont les suivantes :

$$T_{\mathfrak{R}' \rightarrow \mathfrak{R}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_q) & -\sin(\alpha_q) \\ 0 & \sin(\alpha_q) & \cos(\alpha_q) \end{bmatrix} \quad (5.356)$$

$$T_{\mathfrak{R}'' \rightarrow \mathfrak{R}'} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{pq}) & 0 & \sin(\beta_{pq}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta_{pq}) & 0 & \cos(\beta_{pq}) \end{bmatrix} \quad (5.357)$$

$$T_{\mathfrak{R}'' \rightarrow \mathfrak{R}} = T_{\mathfrak{R}' \rightarrow \mathfrak{R}} \times T_{\mathfrak{R}'' \rightarrow \mathfrak{R}'} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{pq}) & 0 & \sin(\beta_{pq}) \\ \sin(\beta_{pq})\sin(\alpha_q) & \cos(\alpha_q) & -\cos(\beta_{pq})\sin(\alpha_q) \\ -\sin(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) & \sin(\alpha_q) & \cos(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) \end{bmatrix} \quad (5.358)$$

$$T_{\mathfrak{R}_R \rightarrow \mathfrak{R}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5.359)$$

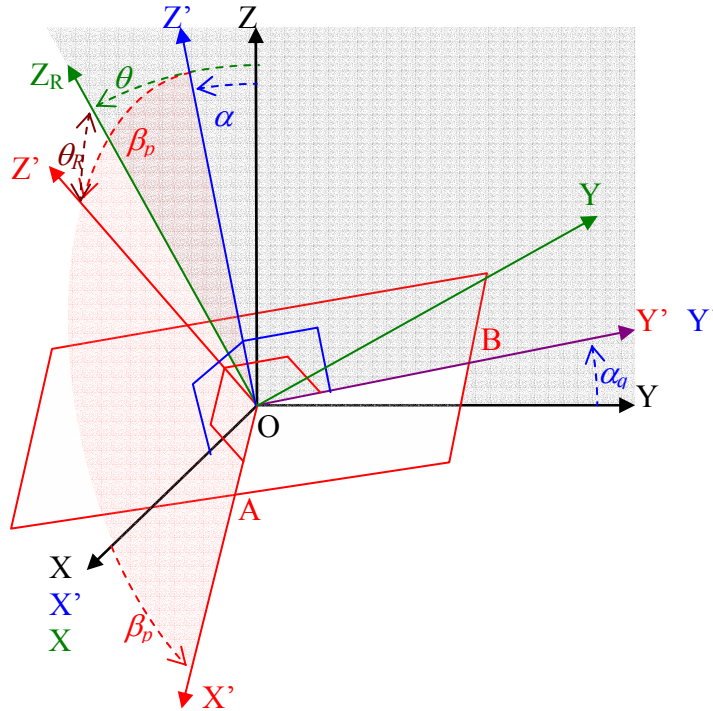


FIGURE 5-5. Géométrie d'observation d'un pixel par le radar.

Le point A est défini comme étant limité par deux plans verticaux en azimut et séparé d'une distance δ_a :

$$\begin{cases} \overrightarrow{OA} \cdot \vec{X} = \frac{\delta_a}{2} \\ \overrightarrow{OA} \cdot \vec{Z}_R = 0 \\ \overrightarrow{OA} = a_1 \vec{X}'' + a_2 \vec{Y}'' \end{cases} \quad (5.360)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \left(T_{\mathfrak{R}'' \rightarrow \mathfrak{R}} \times \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}''} \right) \times \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}} = \frac{\delta_a}{2} \\ \left(T_{\mathfrak{R}'' \rightarrow \mathfrak{R}} \times \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}''} \right) \times \left(T_{\mathfrak{R}_R \rightarrow \mathfrak{R}} \times \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}_R} \right) = 0 \end{cases} \quad (5.361)$$

$$T_{\mathfrak{R}'' \rightarrow \mathfrak{R}} \times \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}''} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{pq}) & 0 & \sin(\beta_{pq}) \\ \sin(\beta_{pq})\sin(\alpha_q) & \cos(\alpha_q) & -\cos(\beta_{pq})\sin(\alpha_q) \\ -\sin(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) & \sin(\alpha_q) & \cos(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) \end{bmatrix} \times \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}''} \quad (5.362)$$

$$T_{\mathfrak{R}'' \rightarrow \mathfrak{R}} \times \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}''} = \begin{vmatrix} \cos(\beta_{pq})a_1 \\ \sin(\beta_{pq})\sin(\alpha_q)a_1 + \cos(\alpha_q)a_2 \\ -\sin(\beta_{pq})\cos(\alpha_q)a_1 + \sin(\alpha_q)a_2 \end{vmatrix} \quad (5.363)$$

$$\begin{cases} \begin{vmatrix} \cos(\beta_{pq})a_1 \\ \sin(\beta_{pq})\sin(\alpha_q)a_1 + \cos(\alpha_q)a_2 \\ -\sin(\beta_{pq})\cos(\alpha_q)a_1 + \sin(\alpha_q)a_2 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}} \times \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}} = \frac{\delta_a}{2} \\ \begin{vmatrix} \cos(\beta_{pq})a_1 \\ \sin(\beta_{pq})\sin(\alpha_q)a_1 + \cos(\alpha_q)a_2 \\ -\sin(\beta_{pq})\cos(\alpha_q)a_1 + \sin(\alpha_q)a_2 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}} \times \begin{vmatrix} 0 \\ -\sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}} = 0 \end{cases} \quad (5.364)$$

$$\begin{cases} \cos(\beta_{pq})a_1 = \frac{\delta_a}{2} \\ -(\sin(\beta_{pq})\sin(\alpha_q)a_1 + \cos(\alpha_q)a_2)\sin(\theta) + (-\sin(\beta_{pq})\cos(\alpha_q)a_1 + \sin(\alpha_q)a_2)\cos(\theta) = 0 \end{cases} \quad (5.365)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{\delta_a}{2 \cos(\beta_{pq})} \\ -\sin(\beta_{pq})\cos(\theta - \alpha_q)a_1 - \sin(\theta - \alpha_q)a_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_1 = \frac{\delta_a}{2 \cos(\beta_{pq})} \\ a_2 = \frac{-a_1 \sin(\beta_{pq})}{\tan(\theta - \alpha_q)} = \frac{-\delta_a \tan(\beta_{pq})}{2 \tan(\theta - \alpha_q)} \end{cases} \quad (5.366)$$

$$\overrightarrow{\text{OA}} = \begin{vmatrix} \frac{\delta_a}{2 \cos(\beta_{pq})} \\ -\delta_a \tan(\beta_{pq}) \\ 2 \tan(\theta - \alpha_q) \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}''} \quad (5.367)$$

Le point B est défini, de manière similaire, comme étant limité par deux plans perpendiculaires \vec{Z}_R à et séparé d'une distance δ_b :

$$\begin{cases} \overrightarrow{\text{OB}} \cdot \vec{X} = 0 \\ \overrightarrow{\text{OB}} \cdot \vec{Z}_R = -\frac{\delta_d}{2} \\ \overrightarrow{\text{OB}} = a_1 \vec{X}'' + a_2 \vec{Y}'' \end{cases} \quad (5.368)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \left(T_{\mathfrak{R}'' \rightarrow \mathfrak{R}} \times \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}''} \right) \times \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}} = 0 \\ \left(T_{\mathfrak{R}'' \rightarrow \mathfrak{R}} \times \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}''} \right) \times \left(T_{\mathfrak{R}_R \rightarrow \mathfrak{R}} \times \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}_R} \right) = -\frac{\delta_d}{2} \end{cases} \quad (5.369)$$

$$\begin{cases} \cos(\beta_{pq}) b_1 = 0 \\ -(\sin(\beta_{pq}) \sin(\alpha_q) b_1 + \cos(\alpha_q) b_2) \sin(\theta) + (-\sin(\beta_{pq}) \cos(\alpha_q) b_1 + \sin(\alpha_q) b_2) \cos(\theta) = -\frac{\delta_d}{2} \end{cases} \quad (5.370)$$

$$\begin{cases} b_1 = 0 \\ -\sin(\theta - \alpha_q) b_2 = -\frac{\delta_d}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b_1 = 0 \\ b_2 = \frac{\delta_d}{2 \sin(\theta - \alpha_q)} \end{cases} \quad (5.371)$$

$$\overrightarrow{\text{OB}} = \begin{vmatrix} 0 \\ \frac{\delta_d}{2 \sin(\theta - \alpha_q)} \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}''} \quad (5.372)$$

Surface du pixel

$$S = 4 \|\overrightarrow{\text{OA}} \wedge \overrightarrow{\text{OB}}\| = 4 \frac{\delta_a \delta_d}{4} \left\| \begin{vmatrix} 1 / \cos(\beta_{pq}) \\ -\tan(\beta_{pq}) / \tan(\theta - \alpha_q) \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}'} \wedge \begin{vmatrix} 0 \\ 1 / \sin(\theta - \alpha_q) \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}'} \right\| \quad (5.373)$$

$$S = 4 \frac{\delta_a \delta_d}{4} \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 1 / \cos(\beta_{pq}) / \sin(\theta - \alpha_q) \end{array} \right\|_{\mathfrak{R}'} = \frac{\delta_a \delta_d}{\cos(\beta_{pq}) \sin(\theta - \alpha_q)} \quad (5.374)$$

Dimensions de la facette

$$l_{OB} = 2 \|\overline{OB}\| = \frac{\delta_d}{\sin(\theta - \alpha_q)}, \quad l_{OA} = 2 \|\overline{OA}\| = \frac{\delta_a}{\cos(\beta_{pq})} \sqrt{1 + \left(\frac{\sin(\beta_{pq})}{\tan(\theta - \alpha_q)} \right)^2} \quad (5.375)$$

Expression de l'angle d'incidence θ_R

Nous pouvons exprimer l'angle d'incidence en fonction du produit scalaire entre la normale \vec{Z}'' à la facette et la direction du radar \vec{Z}_R :

$$\cos(\theta_R) = \vec{Z}'' \cdot \vec{Z}_R = \cos(\beta_{pq}) \cos(\theta - \alpha_q) \quad (5.376)$$

5.1.3.3. Radiométrie et déclivité

Expression en fonction des angles de pente α et β

$$I_m(\theta_a, \phi_a, R_a, \theta_b, \phi_b, R_b, \lambda) = \frac{\Phi_m(\theta_a, \phi_a, R_a, \theta_b, \phi_b, R_b, \lambda)}{\Omega_b} \quad (5.377)$$

$$I_m(\theta_a, \phi_a, R_a, \theta_b, \phi_b, R_b, \lambda) = \left(\sigma_A(\theta_b, \phi_b) \frac{\sigma_{cible}(\theta_a, \phi_a, \theta_b, \phi_b, \lambda)}{4\pi R_b^2} \Phi_t \frac{G(\theta_a, \phi_a)}{4\pi R_a^2} \right) / \left(\frac{R_b^2}{S_A} \right) \quad (5.378)$$

$$I_m(\theta_a, \phi_a, R_a, \theta_b, \phi_b, R_b, \lambda) = \frac{\sigma_A(\theta_b, \phi_b)}{S_A} \frac{\sigma_0(\theta_a, \phi_a, \theta_b, \phi_b, \lambda) S}{4\pi} \Phi_t \frac{G(\theta_a, \phi_a)}{4\pi R_a^2} \quad (5.379)$$

Dans le cas où l'antenne réceptrice est la même que l'antenne émettrice, et où la taille de la scène est telle que le gain de l'antenne varie peu sur la scène, nous pouvons simplifier l'expression de l'intensité reçue :

$$I_m(\theta, \phi, R, \lambda) = \frac{K}{R^2} \frac{\delta_a \delta_d}{\cos(\beta_{pq}) \sin(\theta - \alpha_q)} \sigma_0(\theta, \phi, \lambda) \quad (5.380)$$

Pour une surface lambertienne, nous obtenons finalement :

$$I_m(\theta, R) = \frac{K'}{R^2} \cos(\beta_{pq}) \frac{\cos^2(\theta - \alpha_q)}{\sin(\theta - \alpha_q)} \quad (5.381)$$

Or, en géométrie radar, pour un pixel de coordonnées (u, v) (respectivement azimuth et distance), nous avons dans le référentiel \mathfrak{R}_{sol} (cf. figure 5-6) les relations suivantes :

$$\sin(\theta) = \frac{y}{R} \quad (5.382)$$

$$\tan(\theta) = \frac{y}{\sqrt{R^2 - y^2}} \quad (5.383)$$

$$R = DP + \delta_d v \quad (5.384)$$

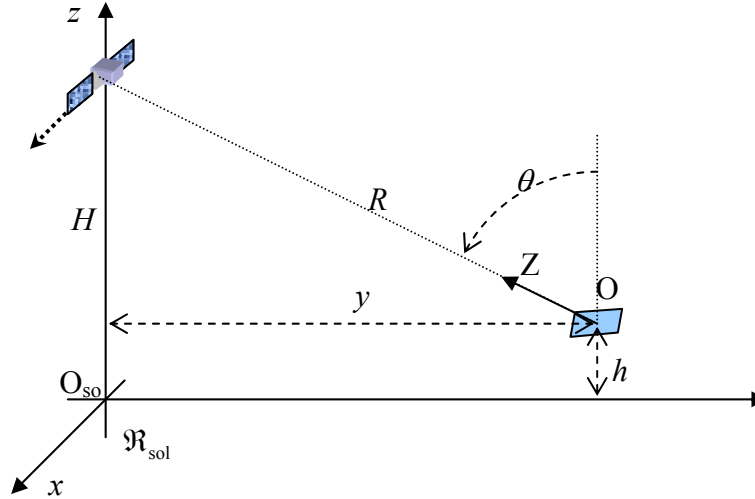


FIGURE 5-6. Géométrie d'acquisition dans un repère sol.

Nous pouvons développer l'expression (5.381) en fonction des angles :

$$I_m(\theta, R) = \frac{K'}{R^2} \cos(\beta_{pq}) \frac{\cos(\theta - \alpha_q)}{\tan(\theta - \alpha_q)} \quad (5.385)$$

$$I_m(\theta, R) = \frac{K'}{R^2} \cos(\beta_{pq}) \frac{(1 + \tan(\theta)\tan(\alpha_q))(\cos(\theta)\cos(\alpha_q) + \sin(\theta)\sin(\alpha_q))}{\tan(\theta) - \tan(\alpha_q)} \quad (5.386)$$

$$I_m(\theta, R) = \frac{K'}{R^2} \sin(\theta) \frac{1 + \tan(\theta)\tan(\alpha_q)}{\tan(\theta) - \tan(\alpha_q)} \left[\cos(\beta_{pq}) \left(\frac{\cos(\alpha_q)}{\tan(\theta)} + \sin(\alpha_q) \right) \right] \quad (5.387)$$

Expression en fonction de p et q

Dans le cadre de la résolution du problème inverse (déclivité d'après la radiométrie), il est parfois utile d'exprimer la radiométrie en fonction des paramètres de déclivité p et q dans le repère \mathfrak{R}_{sol} :

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} \text{ et } q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (5.388)$$

Considérons un point quelconque M de la facette associée au pixel (cf. figure 5-5) :

$$\overrightarrow{OM} = m_1 \overrightarrow{X''} + m_2 \overrightarrow{Y''} \quad (5.389)$$

Si nous voulons exprimer le vecteur dans le repère \mathfrak{R} :

$$\overrightarrow{OM} = m_1 T_{\mathfrak{R}'' \rightarrow \mathfrak{R}} \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} + m_2 T_{\mathfrak{R}'' \rightarrow \mathfrak{R}} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (5.390)$$

$$\overrightarrow{\text{OM}} = m_1 \begin{bmatrix} \cos(\beta_{pq}) & 0 & \sin(\beta_{pq}) \\ \sin(\beta_{pq})\sin(\alpha_q) & \cos(\alpha_q) & -\cos(\beta_{pq})\sin(\alpha_q) \\ -\sin(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) & \sin(\alpha_q) & \cos(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) \end{bmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}''} \quad (5.391)$$

$$+ m_2 \begin{bmatrix} \cos(\beta_{pq}) & 0 & \sin(\beta_{pq}) \\ \sin(\beta_{pq})\sin(\alpha_q) & \cos(\alpha_q) & -\cos(\beta_{pq})\sin(\alpha_q) \\ -\sin(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) & \sin(\alpha_q) & \cos(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) \end{bmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}''}$$

$$\overrightarrow{\text{OM}} = m_1 \begin{vmatrix} \cos(\beta_{pq}) & 0 \\ \sin(\beta_{pq})\sin(\alpha_q) & \cos(\alpha_q) \\ -\sin(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) & \sin(\alpha_q) \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}} + m_2 \begin{vmatrix} 0 \\ \cos(\alpha_q) \\ \sin(\alpha_q) \end{vmatrix}_{\mathfrak{R}} \quad (5.392)$$

$$\begin{cases} x = \overrightarrow{\text{OM}} \cdot \vec{X} \\ y = \overrightarrow{\text{OM}} \cdot \vec{Y} \\ z = \overrightarrow{\text{OM}} \cdot \vec{Z} \end{cases} = \begin{cases} x = m_1 \cos(\beta_{pq}) \\ y = m_1 \sin(\beta_{pq})\sin(\alpha_q) + m_2 \cos(\alpha_q) \\ z = -m_1 \sin(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) + m_2 \sin(\alpha_q) \end{cases} \quad (5.393)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} x = m_1 \cos(\beta_{pq}) \\ \cos(\alpha_q)z - \sin(\alpha_q)y = -m_1 \cos(\alpha_q)\sin(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) - m_1 \sin(\alpha_q)\sin(\beta_{pq}) \end{cases} \quad (5.394)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} x = m_1 \cos(\beta_{pq}) \\ \cos(\alpha_q)z = \sin(\alpha_q)y - m_1 \sin(\beta_{pq})[\cos(\alpha_q)\cos(\alpha_q) + \sin(\alpha_q)] \end{cases} \quad (5.395)$$

$$\Rightarrow z \cos(\beta_{pq})\cos(\alpha_q) = y \cos(\beta_{pq})\sin(\alpha_q) - x \sin(\beta_{pq})[\cos(\alpha_q)\cos(\alpha_q) + \sin(\alpha_q)] \quad (5.396)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} p = \frac{dz}{dx} = -\frac{\sin(\beta_{pq})[\cos(\alpha_q)\cos(\alpha_q) + \sin(\alpha_q)]}{\cos(\beta_{pq})\cos(\alpha_q)} = -\tan(\beta_{pq})[\cos(\alpha_q) + \tan(\alpha_q)] \\ q = \frac{dz}{dy} = \frac{\cos(\beta_{pq})\sin(\alpha_q)}{\cos(\beta_{pq})\cos(\alpha_q)} = \tan(\alpha_q) \end{cases} \quad (5.397)$$

Nous obtenons pouvons exprimer l'ensemble des calculs trigonométriques en fonction de ces deux nouvelles variables :

$$\tan(\alpha_q) = q \quad (5.398)$$

$$\cos(\alpha_q) = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2(\alpha_q)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + q^2}} \quad (5.399)$$

$$\sin(\alpha_q) = \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \tan^2(\alpha_q)}} = \frac{q}{\sqrt{1 + q^2}} \quad (5.400)$$

$$\tan(\beta_{pq}) = -\frac{p}{\cos(\alpha_q) + \tan(\alpha_q)} = -\frac{p}{\frac{1}{\sqrt{1 + q^2}} + q} = -p \frac{\sqrt{1 + q^2}}{1 + q\sqrt{1 + q^2}} \quad (5.401)$$

$$\tan^2(\beta_{pq}) = p^2 \frac{1 + q^2}{(1 + q\sqrt{1 + q^2})^2} = p^2 \frac{1 + q^2}{1 + 2q\sqrt{1 + q^2} + q^2(1 + q^2)} \quad (5.402)$$

$$\cos(\beta_{pq}) = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2(\beta_{pq})}} = \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 \frac{1 + q^2}{1 + 2q\sqrt{1 + q^2} + q^2(1 + q^2)}}} \quad (5.403)$$

Nous pouvons donc réécrire l'équation (5.387) de la radiométrie en fonction des déclivités :

$$I_m(\theta, R) = \frac{K'}{R^3} y \frac{\sqrt{R^2 - y^2} + qy}{y - q\sqrt{R^2 - y^2}} \left[\cos(\beta_{pq}) \frac{1}{\sqrt{1 + q^2}} \left(\frac{\sqrt{R^2 - y^2}}{y} + q \right) \right] \quad (5.404)$$

Cette équation de la radiométrie est donnée pour une image encore dans la géométrie radar. Si l'image a été projetée dans une géométrie sol, l'hypothèse a été faite que la scène observée est plane et horizontale. Les variations de la taille des pixels (en projection sol), en fonction de la distance ont donc été compensées par un rééchantillonnage et une réduction de la radiométrie en fonction de $\sin(\theta)$.

5.2 Module de simulation 2SIR

5.2.1. Description générale

5.2.1.1. Principes de base du simulateur

2SIR est un logiciel de Simulation d'Images Radar et de Simulation d'Interférogrammes Radar (SIRSIR) dédié aux hautes résolutions. Son fonctionnement s'appuie sur trois bases de données de modèles :

- une base de données de matériaux (goudron, béton, sol rocaillieux, herbes rases, etc.) ;
- une base de données d'objets élémentaires (facettes triangulaires et rectangulaires, parallélépipèdes, ellipsoïdes de révolution, etc.) ;
- une modélisation objet de la scène, s'appuyant sur les deux autres bases de données (Modèle Numérique d'Élévation enrichi).

L'utilisateur définit les paramètres de la simulation :

- le capteur : type, propriétés et trajectoire ;
- la scène : objets (forme, localisation) et matériaux associés à chacun d'eux ;
- les paramètres définissant la précision des simulations et des modèles ;

puis lance les calculs.

5.2.1.2. Versions

Les premières versions du logiciel de simulation d'images radar et d'interférogrammes furent nommées 2SIR [Petit 1999] pour Simulation d'Images Radar, Simulation d'Interférogrammes Radar.

Une nouvelle plate-forme a été développée par CS pour accueillir ce simulateur et de nouveaux outils pour la mise en œuvre des techniques de reconstruction du « 3D » par interférométrie radar. Cette plate-forme s'appelle TISER (Tools for Interferometry Simulation and Elevation Reconstruction).

5.2.2. Bases de données du simulateur

5.2.2.1. Base de données de matériaux

Modèle de Ulaby et Dobson

Le modèle employé par Ulaby et Dobson [Ulaby 1989] est empirique. Il est ajusté sur des jeux de mesures effectuées par différents laboratoires et pour différents types de surfaces :

$$\sigma_{0,dB}(\theta_a, \phi_a) = P_1 + P_2 \exp(-P_3 \theta_a) + P_4 \cos(P_5 \theta_a + P_6) \quad (5.405)$$

$$\sigma_0(\theta_a, \phi_a) = 10^{[(P_1 + P_2 \exp(-P_3 \theta_a) + P_4 \cos(P_5 \theta_a + P_6))/10]} \quad (5.406)$$

Cependant, Ulaby et Dobson reconnaissent que l'ensemble des données traitées manifeste une décroissance en cosinus, et qu'une modélisation de type γ_0 (cf. paragraphe 5.1.1.7) serait donc plus appropriée. Nous pouvons également noter que ce modèle n'est défini que dans la direction de rétrodiffusion, ce qui est parfaitement logique, puisqu'il s'agit d'un coefficient de rétrodiffusion. Cependant, dans le cas des rebonds multiples, nous avons besoin de modéliser l'énergie renvoyée dans d'autres directions.

Modèle de 2SIR

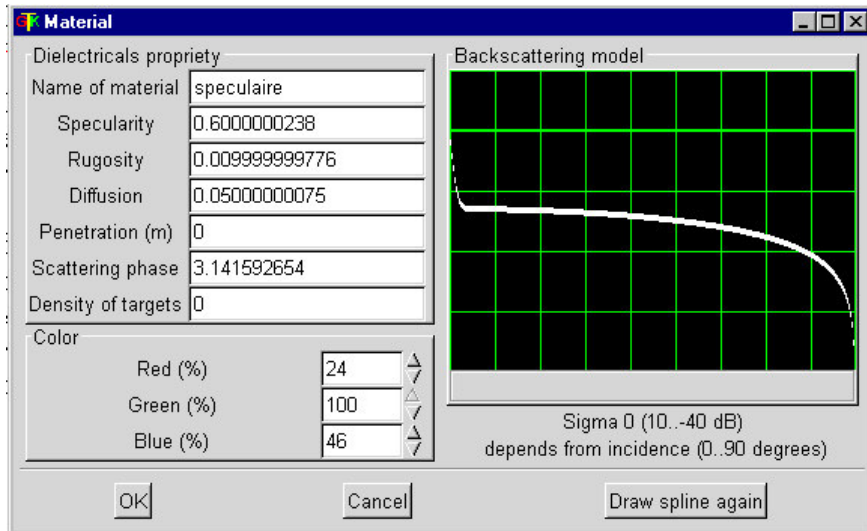


FIGURE 5-7. Exemple de modèle de rétrodiffusion employé par 2SIR (la capture d'écran a été réalisée sous le logiciel TISER développé par CS, qui met en œuvre les principes du simulateur 2SIR).

Nous donnons ici les grandes lignes du modèle de rétrodiffusion utilisé dans 2SIR. Le modèle est semi-empirique et isotrope selon l'angle azimutal ϕ . Il est construit à partir de deux modèles fondamentaux : le modèle lambertien et le modèle de surface lisse auquel a été adjoint un paramètre de rugosité κ . Il est ajusté grâce aux données des tables produites par Ulaby et Dobson [Ulaby 1989]. Il n'a pas de dépendance explicite en λ , mais des paramètres différents sont utilisés pour chaque bande spectrale :

$$\sigma_0(\theta_i, \phi_i, \theta_d, \phi_d, \lambda) = 4\pi \cos(\theta_i) \cos(\theta_d) \left[\rho_0(\lambda) + R(\lambda) \exp\left(-\frac{\sin(\xi'(\theta_i, \phi_i, \theta_d, \phi_d)/2)}{\kappa(\lambda)}\right) \right] \quad (10.407)$$

où $\xi'(\theta_i, \phi_i, \theta_d, \phi_d)$ (différence angulaire entre la direction de réflexion et la direction spéculaire) est défini, à partir des angles zénithaux et azimutaux d'incidence et de diffusion, de la façon suivante :

$$\xi'(\theta_i, \phi_i, \theta_d, \phi_d) = \text{acos}[\cos(\theta_d)\cos(\theta_i) + \sin(\theta_d)\sin(\theta_i)\cos(\phi_d - \phi_i)] \quad (10.408)$$

5.2.2.2. Base de données d'objets

Propriétés générales

Chaque objet est défini par quatre propriétés qui sont paramétrées – entre autres – par deux vecteurs $\vec{v}_1 = (v_{1,x}, v_{1,y}, v_{1,z})$ et $\vec{v}_2 = (v_{2,x}, v_{2,y}, v_{2,z})$:

- sa forme (paramétrée par les deux vecteurs) ;
- son origine (définie par le type d'objet) ;
- son centre (paramétré par les deux vecteurs) ;
- sa normale (paramétrée par les deux vecteurs).

La forme borne la répartition spatiale des cibles distribuées aléatoirement. Elle est définie par un ou deux vecteurs.

L'origine est le point qui localise l'objet global. La position donnée pour chaque objet dans une scène est donc celle qui repère ce point.

Le centre définit en partie le calcul de la normale et est utilisé dans l'illumination partielle. Un objet n'est visible que si son centre est dans le champ de visibilité de l'image.

La normale est utilisée pour le modèle de rétrodiffusion. Pour les objets volumiques, il ne s'agit pas nécessairement de la vraie normale. En revanche, il s'agit d'une vraie normale pour les objets surfaciques. Dans ce second cas, elle intervient dans le calcul des rebonds.

Objets surfaciques

2SIR dispose, dans sa version de base, de trois objets surfaciques :

- La facette : il s'agit d'un parallélogramme défini par les deux vecteurs. Le triplet $(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{n})$, où \vec{n} désigne la normale, définit un trièdre direct (cf. figure 5-8). La facette n'est visible que si sa normale est tournée vers le capteur. Vue de l'autre côté, elle est ignorée.

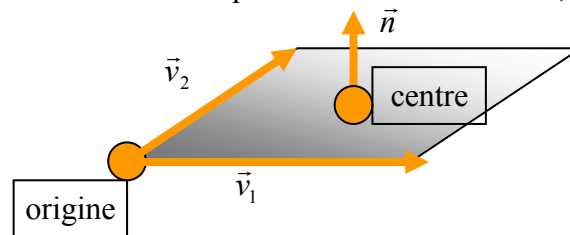
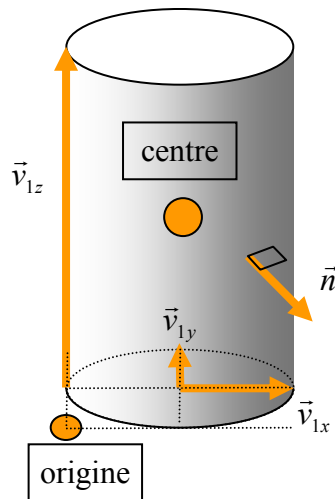
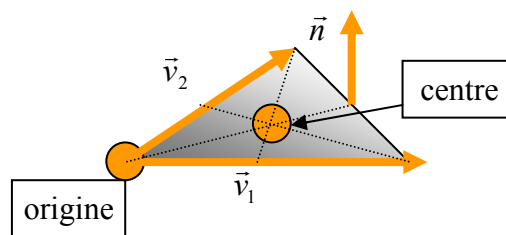


FIGURE 5-8. Facette.

- Le cylindre creux : il est forcément vertical et est défini grâce à \vec{v}_1 uniquement. La composante de \vec{v}_1 suivant un axe définit la taille du cylindre selon cet axe (cf. figure 5-9). Cet objet permet de représenter par exemple des troncs d'arbres, des poteaux et des lampadaires. Les normales sont forcément horizontales.

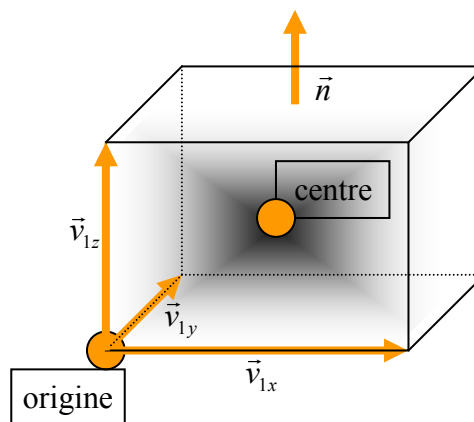
FIGURE 5-9. *Cylindre creux.*

- Le triangle : il dispose de propriétés similaires à celles de la facette, sauf que sa surface est deux fois moindre et que son centre se trouve à l'intersection des médianes (cf. figure 5-10).

FIGURE 5-10. *Triangle.*

Objets volumiques

- Le parallélépipède : seul \vec{v}_1 est employé pour définir ses dimensions selon les trois axes (cf. figure 5-11).

FIGURE 5-11. *Parallélépipède.*

- L'ellipsoïde de révolution : les dimensions de l'ellipsoïde de révolution sont définies par les composantes du vecteur \vec{v}_1 (cf. figure 5-12). La normale est orientée du centre vers la périphérie.

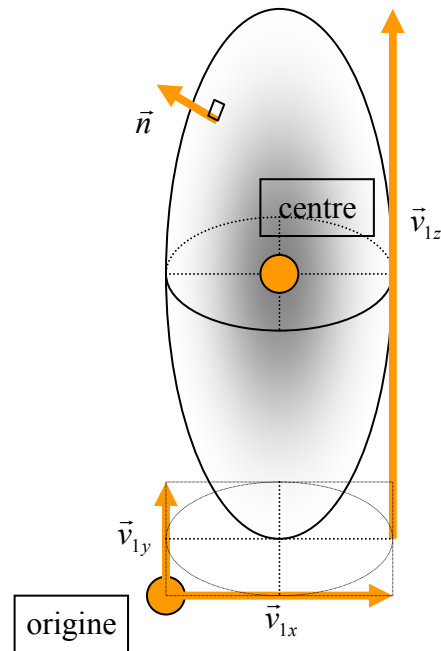


FIGURE 5-12. *Ellipsoïde de révolution.*

- Le cylindre plein : ses propriétés sont identiques à celles du cylindre creux, sauf que la distribution des cibles est volumique.

5.2.2.3. Base de données de terrains

La scène doit entièrement être décrite grâce aux objets définis précédemment. Leurs localisations et leurs formes sont spécifiées dans la description et un type de matériau est associé à chaque objet. Il n'y a aucune restriction sur la modélisation de la scène. Elle peut avoir n'importe quelle forme, et occuper autant d'espace que souhaité. La partie qui sera réellement visible est déterminée par les paramètres d'observation (trajectoire, localisation, etc.).

Un outil de 2SIR permet de convertir un MNE généré par un quelconque moyen en une base de données de terrains (BDMOT : Base de Données de Modélisation Objet du Terrain). De par la nature plus riche de la BDMOT, le type de matériau et le type d'objet utilisés doivent être paramétrés à la conversion. La BDMOT peut ensuite être éventuellement complétée manuellement, afin d'y adjoindre des éléments particuliers (bâtiments, coins réflecteurs dans un paysage, etc.).

5.2.3. Simulation du signal retourné

5.2.3.1. Le lancer de rayons

Distribution de cibles

Pour reproduire les échos renvoyés par une surface éclairée par un radar, 2SIR génère des distributions aléatoires de cibles ponctuelles (*cf.* figure 5-13). Sur la surface et dans le volume des objets, des réflecteurs sont disposés, dont les propriétés sont celles associées au matériau choisi. Les échos individuels sont sommés de manière cohérente, de façon à modéliser le comportement du *speckle*. Lorsque le nombre de cibles est suffisant et que la distribution est surfacique, la statistique de la radiométrie suit une loi de Rayleigh. Cependant, selon le nombre de cibles et leur répartition, de nombreuses autres statistiques peuvent être reproduites.

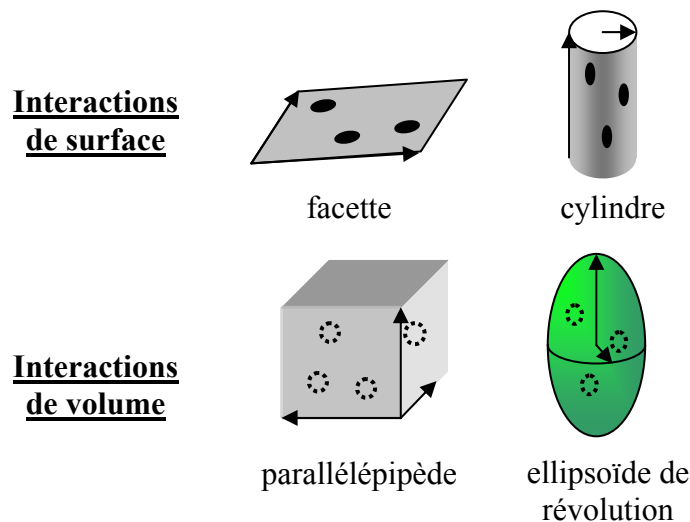
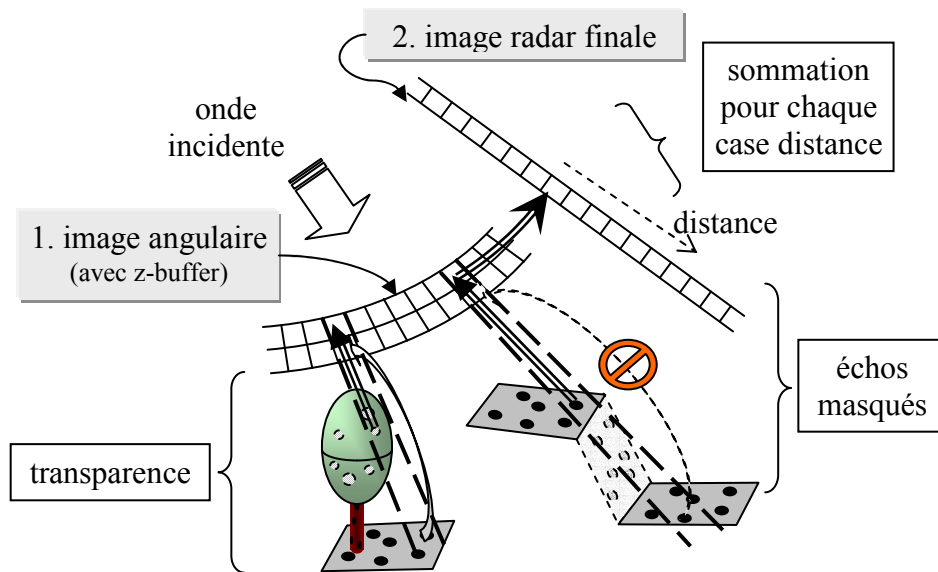


FIGURE 5-13. Distributions de cibles ponctuelles.

Masquage et transparence

Afin de gérer au mieux les effets de masquage et de transparence entre objets, l'image radar simulée est produite en deux étapes (*cf.* figure 5-14) :

1. Une première image angulaire est générée par le simulateur. Les échos sont stockés dans un *z-buffer* indexé par l'indice de distance de l'écho.
2. Ensuite, les *z-buffer* sont purgés des échos cachés et l'amplitude des échos masqués par des objets plus ou moins transparents est atténuée. Les échos restants sont sommés, toujours de manière cohérente, dans l'image radar finale en fonction de leur indice en distance.

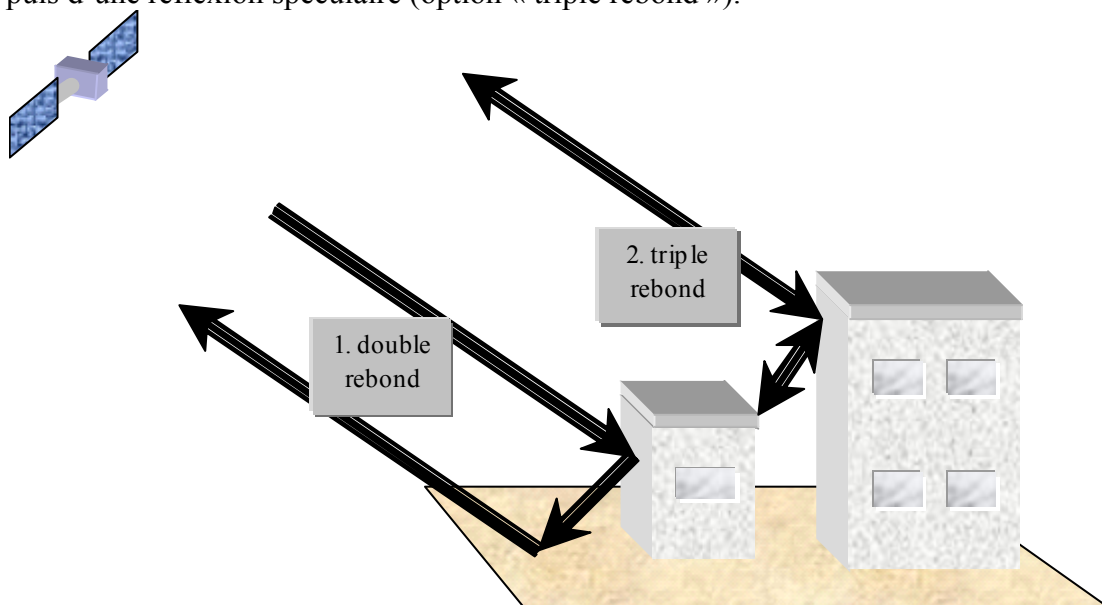
FIGURE 5-14. *Étapes de la simulation.*

Dans les techniques classiques de « lancer de rayons », le rayon part du pixel final vers la surface. Le principe a été ici inversé, afin de permettre de modéliser le *speckle*.

Gestion des rebonds

Si l'option est sélectionnée, 2SIR peut simuler les rebonds de l'onde sur les surfaces. Pour ce faire, un « vrai » lancer de rayons est effectué depuis chaque cible vers la scène. Puisque cela signifie que l'ensemble de la scène doit être parcourue pour trouver l'intersection de ce rayon avec un élément, le coût en terme de temps de calcul devient rapidement prohibitif pour des scènes complexes. C'est pourquoi 2SIR ne modélise que deux types de réflexions spéculaires (cf. figure 5-15) :

1. Une réflexion spéculaire suivie d'une réflexion diffuse par un autre objet vers le capteur radar (option « double rebond »).
2. Une réflexion spéculaire suivie d'une rétrodiffusion par un autre objet vers le premier, puis d'une réflexion spéculaire (option « triple rebond »).

FIGURE 5-15. *Exemples de double et triple rebonds.*

5.2.3.2. Modélisation du signal reçu

Modèle de Goodman étendu

Les calculs de simulation mettent en œuvre le modèle de Goodman étendu (*cf.* paragraphe 2.3.1.2) dans le cas où la réponse impulsionnelle est du type « fonction de Dirac ». Les contributions des cibles élémentaires sont sommées de manière cohérente. Les phénomènes d'interférences réduisent la radiométrie, par rapport à celle attendue pour N cibles par pixel. Toutefois, pour N suffisamment grand (>50), la radiométrie reste sensiblement proportionnelle à N .

Atténuation du signal dans les volumes

Un coefficient de pénétration a été défini pour certains matériaux. Ces matériaux peuvent être associés à des objets volumiques. Les ondes radar qui traversent de tels objets sont atténuées, voire absorbées. Ce phénomène intervient à deux niveaux :

- au niveau de l'objet volumique, les cibles distribuées aléatoirement produisent un écho moins puissant lorsqu'ils sont en profondeur dans l'objet ;
- au niveau du trajet de l'onde, lorsque l'onde rencontre un objet volumique, le signal est atténué selon l'épaisseur traversée.

Ces possibilités ne sont pas employées dans les travaux de thèse présentés et ne sont donc pas détaillées.

Réception du signal

Dans 2SIR, le diagramme d'antenne est du type « fonction porte ». Un diagramme d'antenne plus réaliste pourrait être aisément introduit, mais il n'a pas été jugé utile de le faire. Les paramètres de simulation, comme le gain ou la puissance émise, ont donc été regroupés dans un seul coefficient G . Le champ \underline{E} renvoyé par une cible élémentaire est donc calculé de la façon suivante :

$$|\underline{E}(\theta_a, \phi_a, R_a, \theta_b, \phi_b, R_b, \lambda)| = G \frac{\lambda}{4\pi R_a R_b} \sqrt{\sigma_0(\theta_a, \phi_a, \theta_b, \phi_b, \lambda)} \quad (5.409)$$

$$\text{Arg}(\underline{E}(\theta_a, \phi_a, R_a, \theta_b, \phi_b, R_b, \lambda)) = \frac{2\pi}{\lambda} (R_a + R_b) + \varphi_{\text{rétrodiffusion}} \quad (5.410)$$

Dans le cas des rebonds multiples, la formulation est plus complexe et n'est pas décrite ici.

5.2.3.3. Les modes interférométriques

Acquisitions simultanées

Il est possible de simuler un système radar interférométrique mono-passe, correspondant au cas où les deux acquisitions sont simultanées. Bien que la distribution des cibles soit aléatoire, ce mode garantit une répartition identique pour les deux images, qui sont générées simultanément. Il convient particulièrement bien aux systèmes interférométriques stéréoscopiques.

Cependant, une grande latitude est accordée à la définition des trajectoires, puisque les trajectoires des deux capteurs radar peuvent être totalement indépendantes.

Acquisitions non simultanées

L'usage de l'interférométrie différentielle suppose que la scène a changé entre les deux acquisitions. Cette technique ne peut donc être utilisée qu'entre deux acquisitions non simultanées. Il est nécessaire pour cela de générer une simulation, puis de modifier la scène, et enfin d'acquérir une nouvelle image.

Si le simulateur est directement utilisé pour générer les deux acquisitions non simultanées, la cohérence interférométrique obtenue entre les deux images sera nulle, puisque la distribution aléatoire des cibles lors de la seconde acquisition sera *a priori* différente.

Pour pallier cette difficulté, le générateur aléatoire peut être initialisé selon différents modes, à chaque acquisition :

- *Speckle* spatialement corrélé : le générateur de nombres aléatoires est initialisé pour chaque objet à l'aide de sa localisation horizontale (coordonnées (x, y) de l'origine de l'objet). Ce mode permet d'effectuer un interférogramme différentiel sur un MNT qui se déforme, si le maillage de celui-ci reste identique (seule les altitudes changent). En pratique, l'incidence visuelle sur le *speckle* de l'image est négligeable.
- *Speckle* géométriquement corrélé : le générateur de nombres aléatoires est initialisé pour chaque objet avec les paramètres de forme de l'objet (les vecteurs \vec{v}_1 et \vec{v}_2). Si ce mode est utilisé seul, et que la scène est composée d'objets de formes identiques (par exemple, des facettes de même taille et rectangulaires), le *speckle* risque de présenter une corrélation indésirable.

5.3 Développement complet des calculs

5.3.1. Approximation géométrique utilisée en interférométrie

Nous voulons donner une approximation de la distance $R' = \|\vec{R}'\|$ en fonction de $R = \|\vec{R}\|$, $u = \|\vec{u}\|$ et χ quand $\frac{u}{R} \ll 1$ (cf. figure ci-dessous).

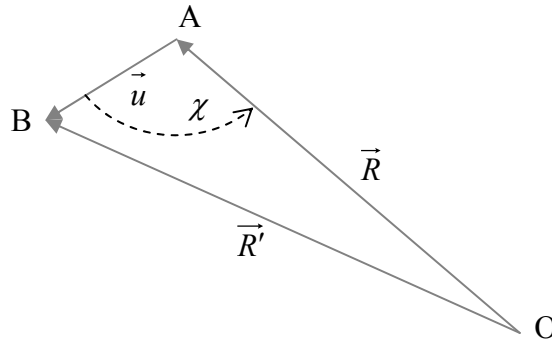


FIGURE 5-16. Différence de distance entre les points A, B et O.

Nous avons :

$$R' - R = \|\vec{R}'\| - \|\vec{R}\| = \|\vec{R} + \vec{u}\| - \|\vec{R}\| \quad (5.411)$$

$$\|\vec{R} + \vec{u}\| = \sqrt{R^2 + 2\vec{R} \cdot \vec{u} + u^2} = R \sqrt{1 + \frac{2\vec{R} \cdot \vec{u} + u^2}{R^2}} \quad (5.412)$$

Nous pouvons employer le développement limité à l'ordre 2 :

$$\sqrt{1+\varepsilon} = 1 + \frac{1}{2}\varepsilon - \frac{1}{8}\varepsilon^2 + O^3(\varepsilon) \quad (5.413)$$

Soit :

$$\|\vec{R} + \vec{u}\| = R \left(1 + \frac{1}{2} \frac{2\vec{R} \cdot \vec{u} + u^2}{R^2} - \frac{1}{8} \left(\frac{2\vec{R} \cdot \vec{u} + u^2}{R^2} \right)^2 + O^3\left(\frac{u}{R}\right) \right) \quad (5.414)$$

$$\|\vec{R} + \vec{u}\| = R \left(1 + \frac{\vec{R} \cdot \vec{u}}{R^2} + \frac{u^2}{2R^2} - \frac{1}{2} \frac{(\vec{R} \cdot \vec{u})^2}{R^4} - \frac{1}{2} \frac{u^2 \vec{R} \cdot \vec{u}}{R^4} - \frac{1}{8} \frac{u^4}{R^4} + O^3\left(\frac{u}{R}\right) \right) \quad (5.415)$$

$$\|\vec{R} + \vec{u}\| = R \left(1 + \frac{\vec{R} \cdot \vec{u}}{R^2} + \frac{u^2}{2R^2} - \frac{1}{2} \frac{(\vec{R} \cdot \vec{u})^2}{R^4} + O^3\left(\frac{u}{R}\right) \right) \quad (5.416)$$

$$\|\vec{R} + \vec{u}\| = R \left(1 + \frac{\vec{R} \cdot \vec{u}}{R^2} + \frac{u^2}{2R^2} \left(1 - \left(\frac{\vec{R} \cdot \vec{u}}{Ru} \right)^2 \right) + O^3\left(\frac{u}{R}\right) \right) \quad (5.417)$$

C'est-à-dire, en fonction de l'angle χ :

$$\|\vec{R} + \vec{u}\| = R \left(1 + \frac{u}{R} \cos(\chi) + \frac{u^2}{2R^2} \sin^2(\chi) + O^3\left(\frac{u}{R}\right) \right) \quad (5.418)$$

Ou encore :

$$\|\vec{R} + \vec{u}\| = R + u \cos(\chi) + \frac{u^2}{2R} \sin^2(\chi) + RO^3\left(\frac{u}{R}\right) \quad (5.419)$$

5.3.2. Extension du modèle de Goodman

Cette démonstration vise à estimer l'espérance statistique de la réponse, mesurée au sein d'un pixel de l'image, dans le cadre du modèle de Goodman étendu à la phase, défini dans le paragraphe 2.3.1.2.

La nouvelle expression de la réponse \underline{E}_N mesurée dans un pixel en (x_0, y_0) est alors :

$$\underline{E}_N = \int_{x_0 - \delta_a/2}^{x_0 + \delta_a/2} \int_{y_0 - \delta_d/2}^{y_0 + \delta_d/2} \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^{(2n+1)^2 N} a_k e^{j\phi(y_k)} h_y(y_k - y) h_x(x_k - x) dy dx \quad (5.420)$$

L'expression de la phase du signal d'une cible ponctuelle est définie selon l'expression couramment employée en interférométrie :

$$\phi(y_k) = \frac{2\pi}{\lambda} 2y_k \quad (5.421)$$

Nous allons chercher à estimer l'espérance du champ complexe \underline{E}_N . En permutant les intégrales et la somme et en décomposant l'intégrale double en produit d'intégrales, nous obtenons une nouvelle expression de la réponse :

$$\underline{E}_N = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^{(2n+1)^2 N} a_k e^{j\phi(y_k)} \int_{y_0 - \delta_d/2}^{y_0 + \delta_d/2} h_y(y_k - y) dy \int_{x_0 - \delta_a/2}^{x_0 + \delta_a/2} h_x(x_k - x) dx \quad (5.422)$$

Notons H_x et H_y les primitives respectives de h_x et h_y . Les intégrales précédentes s'écrivent, en posant $x' = x_k - x$ et $y' = y_k - y$:

$$\int_{x_0 - \delta_a/2}^{x_0 + \delta_a/2} h_x(x_k - x) dx = \int_{x_k - x_0 - \delta_a/2}^{x_k - x_0 + \delta_a/2} h_x(x') dx' = H_x\left(x_k - x_0 + \frac{\delta_a}{2}\right) - H_x\left(x_k - x_0 - \frac{\delta_a}{2}\right) \quad (5.423)$$

$$\int_{y_0 - \delta_d/2}^{y_0 + \delta_d/2} h_y(y_k - y) dy = \int_{y_k - y_0 - \delta_d/2}^{y_k - y_0 + \delta_d/2} h_y(y') dy' = H_y\left(y_k - y_0 + \frac{\delta_d}{2}\right) - H_y\left(y_k - y_0 - \frac{\delta_d}{2}\right) \quad (5.424)$$

Il vient donc :

$$\underline{E}_N = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^{(2n+1)^2 N} a_k e^{j\phi(y_k)} \left[H_y\left(y_k - y_0 + \frac{\delta_d}{2}\right) - H_y\left(y_k - y_0 - \frac{\delta_d}{2}\right) \right] \left[H_x\left(x_k - x_0 + \frac{\delta_a}{2}\right) - H_x\left(x_k - x_0 - \frac{\delta_a}{2}\right) \right] \quad (5.425)$$

Nous pouvons maintenant estimer l'espérance de la réponse \underline{E}_N :

$$E[\underline{E}_N] = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^{(2n+1)^2 N} E[a_k] E[e^{j\phi(y_k)} \Delta H_y] E[\Delta H_x] \quad (5.426)$$

avec :

$$\Delta H_y = H_y\left(y_k - y_0 + \frac{\delta_d}{2}\right) - H_y\left(y_k - y_0 - \frac{\delta_d}{2}\right) \quad (5.427)$$

$$\Delta H_x = H_x\left(x_k - x_0 + \frac{\delta_a}{2}\right) - H_x\left(x_k - x_0 - \frac{\delta_a}{2}\right) \quad (5.428)$$

Les dépendances en x_0 , x_k , y_0 et y_k sont omises, afin d'alléger l'écriture.

Comme le fait Goodman, nous allons supposer que N est très grand. Compte tenu du fait que la distribution aléatoire est uniforme, nous pouvons remplacer le calcul de l'espérance par un calcul d'intégrale sur $(2n+1) \times (2n+1)$ pixels, c'est-à-dire sur une surface égale à $(2n+1) \times \delta_a \times (2n+1) \times \delta_d$ m^2 :

$$E[\underline{E}_N] = \lim_{n \rightarrow +\infty} (2n+1)^2 N E[a_k] \frac{1}{(2n+1)\delta_d} \int_{y_0 - (n+1/2)\delta_d}^{y_0 + (n+1/2)\delta_d} e^{j\phi(y_k)} \Delta H_y dy_k \frac{1}{(2n+1)\delta_a} \int_{x_0 - (n+1/2)\delta_a}^{x_0 + (n+1/2)\delta_a} \Delta H_x dx_k \quad (5.429)$$

$$E[\underline{E}_N] = \frac{N}{\delta_d \delta_a} E[a_k] \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\phi(y_k)} \Delta H_y dy_k \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta H_x dx_k \quad (5.430)$$

En effectuant les substitutions suivantes :

$$s = x_k - x_0 \quad (5.431)$$

$$t = y_k - y_0 \quad (5.432)$$

nous pouvons écrire :

$$E[\underline{E}_N] = \frac{N}{\delta_d \delta_a} E[a_k] \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\phi(y_0+t)} \left[H_y\left(t + \frac{\delta_d}{2}\right) - H_y\left(t - \frac{\delta_d}{2}\right) \right] dt \int_{-\infty}^{+\infty} \left[H_x\left(s + \frac{\delta_a}{2}\right) - H_x\left(s - \frac{\delta_a}{2}\right) \right] ds \quad (5.433)$$

En posant :

$$A_a(\delta_a) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[H_x\left(s + \frac{\delta_a}{2}\right) - H_x\left(s - \frac{\delta_a}{2}\right) \right] ds \quad (5.434)$$

$$A_d(\delta_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\phi(y_0+t)} \left[H_y\left(t + \frac{\delta_d}{2}\right) - H_y\left(t - \frac{\delta_d}{2}\right) \right] dt \quad (5.435)$$

nous obtenons :

$$E[\underline{E}_N] = \frac{N}{\delta_d \delta_a} E[a_k] A_a(\delta_a) A_d(\delta_d) \quad (5.436)$$

Nous choisissons de traiter le cas simple d'une réponse impulsionnelle du type « sinus cardinal selon les deux axes » (cf. paragraphe 2.3.2.2) :

$$h_x(u) = h_y(u) = h(u) = \text{sinC}\left(\frac{k_h \pi}{\Delta} u\right) \quad (5.437)$$

$$k_h = \frac{2 \arcsin C(10^{-3/20})}{\pi} \quad (5.438)$$

En définissant la fonction sinCint comme étant une primitive de la fonction sinus cardinal, nous pouvons écrire :

$$H_x(u) = H_y(u) = H(u) = \frac{\Delta}{k_h \pi} \text{sinCint}\left(\frac{k_h \pi}{\Delta} u\right) \quad (5.439)$$

Nous en déduisons :

$$A_a(\delta_a) = \frac{\Delta}{k_h \pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\text{sinCint}\left(\frac{k_h \pi}{\Delta} \left(s + \frac{\delta_a}{2}\right)\right) - \text{sinCint}\left(\frac{k_h \pi}{\Delta} \left(s - \frac{\delta_a}{2}\right)\right) \right] ds \quad (5.440)$$

En recourant aux variables intermédiaires suivantes :

$$s' = \frac{k_h \pi}{\Delta} s \quad (5.441)$$

$$\delta_a' = \frac{k_h \pi}{\Delta} \delta_a \quad (5.442)$$

nous obtenons :

$$A_a(\delta_a) = \left(\frac{\Delta}{k_h \pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\text{sinCint}\left(s' + \frac{\delta_a'}{2}\right) - \text{sinCint}\left(s' - \frac{\delta_a'}{2}\right) \right] ds' \quad (5.443)$$

La fonction sinCint peut s'écrire sous la forme de la somme d'une série entière :

$$\text{sinCint}(s') = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \frac{s'^{2n+1}}{(2n+1)!} \quad (5.444)$$

Donc :

$$A_a(\delta_a) = \left(\frac{\Delta}{k_h \pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \frac{1}{(2n+1)!} \left[\left(s' + \frac{\delta_a'}{2}\right)^{2n+1} - \left(s' - \frac{\delta_a'}{2}\right)^{2n+1} \right] ds' \quad (5.445)$$

En inversant la somme et l'intégrale :

$$A_a(\delta_a) = \left(\frac{\Delta_a}{k_h \pi} \right)^2 \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \frac{1}{(2n+1)!} \lim_{S \rightarrow +\infty} \left[\frac{1}{2n+2} \left(\left(s' + \frac{\delta_a'}{2} \right)^{2n+2} - \left(s' - \frac{\delta_a'}{2} \right)^{2n+2} \right) \right]_{-S}^{+S} \quad (5.446)$$

$$A_a(\delta_a) = \left(\frac{\Delta_a}{k_h \pi} \right)^2 \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \frac{1}{(2n+1)!} \lim_{S \rightarrow +\infty} \left[\frac{s'^{2n+2}}{2n+2} \left(\left(1 + \frac{\delta_a'}{2s'} \right)^{2n+2} - \left(1 - \frac{\delta_a'}{2s'} \right)^{2n+2} \right) \right]_{-S}^{+S} \quad (5.447)$$

$$A_a(\delta_a) = \left(\frac{\Delta_a}{k_h \pi} \right)^2 \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \frac{1}{(2n+1)!} \lim_{S \rightarrow +\infty} \left[\frac{2S^{2n+2}}{2n+2} \left(\left(1 + \frac{\delta_a'}{2S} \right)^{2n+2} - \left(1 - \frac{\delta_a'}{2S} \right)^{2n+2} \right) \right] \quad (5.448)$$

Lorsque $S \rightarrow +\infty$, $\frac{\delta_a'}{2S}$ tend vers 0. Nous pouvons donc écrire des développements limités à l'ordre 1 en $\frac{\delta_a'}{2S}$. Néanmoins, il s'agit encore bien d'égalités. En effet, nous pouvons montrer que les termes d'ordres supérieurs ont des contributions nulles lorsque $S \rightarrow +\infty$. Nous obtenons donc :

$$A_a(\delta_a) = \left(\frac{\Delta_a}{k_h \pi} \right)^2 \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \frac{1}{(2n+1)!} \lim_{S \rightarrow +\infty} \left[\frac{2S^{2n+2}}{2n+2} \left(1 + (2n+2) \frac{\delta_a'}{2S} - 1 + (2n+2) \frac{\delta_a'}{2S} \right) \right] \quad (5.449)$$

$$A_a(\delta_a) = \left(\frac{\Delta_a}{k_h \pi} \right)^2 \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \frac{1}{(2n+1)!} \lim_{S \rightarrow +\infty} \left(2S^{2n+1} \delta_a' \right) \quad (5.450)$$

$$A_a(\delta_a) = \left(\frac{\Delta_a}{k_h \pi} \right)^2 2\delta_a' \lim_{S \rightarrow +\infty} \left(\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \frac{S^{2n+1}}{(2n+1)!} \right) \quad (5.451)$$

$$A_a(\delta_a) = \left(\frac{\Delta_a}{k_h \pi} \right)^2 2\delta_a' \lim_{S \rightarrow +\infty} \sin C(S) \quad (5.452)$$

Or, comme la fonction sinC est paire :

$$\lim_{S \rightarrow +\infty} \sin C(S) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \sin C(s') ds' \quad (5.453)$$

et il est bien connu que cette dernière intégrale est sommable et vaut π , donc :

$$A_a(\delta_a) = \left(\frac{\Delta_a}{k_h \pi} \right)^2 \delta_a' \pi \quad (5.454)$$

En remplaçant δ_a' par son expression (5.442), nous obtenons finalement :

$$A_a(\delta_a) = \frac{\Delta_a}{k_h} \delta_a \quad (5.455)$$

Pour calculer le second terme intégral de (5.436), nous pouvons procéder de même que précédemment :

$$A_d(\delta_d) = \frac{\Delta_d}{k_h \pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{j4\pi}{\lambda}(y_0+t)} \left[\text{sinCint}\left(\frac{k_h \pi}{\Delta_d} \left(t + \frac{\delta_d}{2}\right)\right) - \text{sinCint}\left(\frac{k_h \pi}{\Delta_d} \left(t - \frac{\delta_d}{2}\right)\right) \right] dt \quad (5.456)$$

En recourant aux variables intermédiaires suivantes :

$$t' = \frac{k_h \pi}{\Delta_d} t \quad (5.457)$$

$$\delta_d' = \frac{k_h \pi}{\Delta_d} \delta_d \quad (5.458)$$

nous obtenons :

$$A_d(\delta_d) = \left(\frac{\Delta_d}{k_h \pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{j}{\lambda} \left(\frac{4\pi}{\lambda} y_0 + \frac{4\Delta_d}{\lambda k_h} t'\right)} \left[\text{sinCint}\left(t' + \frac{\delta_d'}{2}\right) - \text{sinCint}\left(t' - \frac{\delta_d'}{2}\right) \right] dt' \quad (5.459)$$

Pour pouvoir calculer cette intégrale, nous devons approximer la fonction sinCint. Nous employons la simplification suivante (l'impact de cette simplification sera envisagé dans le paragraphe 2.3.2.6) :

$$\text{sinCint}(u) \approx \begin{cases} -\pi/2 & \text{si } u < -\pi/2 \\ +\pi/2 & \text{si } u > +\pi/2 \\ u & \text{si } -\pi/2 \leq u \leq +\pi/2 \end{cases} \quad (5.460)$$

L'intégrale se calcule en décomposant le domaine de définition de la fonction approchante de sinCint en cinq domaines, à savoir : $]-\infty, -\pi/2 - \delta_d'/2]$, $[-\pi/2 - \delta_d'/2, -\pi/2 + \delta_d'/2]$, $[-\pi/2 + \delta_d'/2, \pi/2 - \delta_d'/2]$, $[\pi/2 - \delta_d'/2, \pi/2 + \delta_d'/2]$ et $[\pi/2 + \delta_d'/2, +\infty[$.

L'expression (5.459) peut donc être approximée par :

$$\begin{aligned} A_d(\delta_d) \approx & \left(\frac{\Delta_d}{k_h \pi}\right)^2 \left\{ \int_{-\infty}^{-\pi/2 - \delta_d'/2} e^{\frac{j}{\lambda} \left(\frac{4\pi}{\lambda} y_0 + \frac{4\Delta_d}{\lambda k_h} t'\right)} \left[-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right] dt' \right. \\ & + \int_{-\pi/2 - \delta_d'/2}^{-\pi/2 + \delta_d'/2} e^{\frac{j}{\lambda} \left(\frac{4\pi}{\lambda} y_0 + \frac{4\Delta_d}{\lambda k_h} t'\right)} \left[\left(t' + \frac{\delta_d'}{2}\right) + \frac{\pi}{2}\right] dt' \\ & + \int_{-\pi/2 + \delta_d'/2}^{+\pi/2 - \delta_d'/2} e^{\frac{j}{\lambda} \left(\frac{4\pi}{\lambda} y_0 + \frac{4\Delta_d}{\lambda k_h} t'\right)} [\delta_d'] dt' \\ & + \int_{+\pi/2 - \delta_d'/2}^{+\pi/2 + \delta_d'/2} e^{\frac{j}{\lambda} \left(\frac{4\pi}{\lambda} y_0 + \frac{4\Delta_d}{\lambda k_h} t'\right)} \left[+\frac{\pi}{2} - \left(t' - \frac{\delta_d'}{2}\right)\right] dt' \\ & \left. + \int_{+\pi/2 + \delta_d'/2}^{+\infty} e^{\frac{j}{\lambda} \left(\frac{4\pi}{\lambda} y_0 + \frac{4\Delta_d}{\lambda k_h} t'\right)} \left[+\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2}\right] dt' \right\} \quad (5.461) \end{aligned}$$

Soit :

$$\begin{aligned}
 A_d(\delta_d) \approx & \left(\frac{\Delta_d}{k_h \pi} \right)^2 e^{\frac{j4\pi}{\lambda} y_0} \left\{ \int_{-\pi/2 - \delta_d'/2}^{-\pi/2 + \delta_d'/2} e^{\frac{j4\Delta_d}{\lambda k_h} t'} \left[\left(t' + \frac{\delta_d'}{2} \right) + \frac{\pi}{2} \right] dt' \right. \\
 & + \int_{-\pi/2 - \delta_d'/2}^{+\pi/2 - \delta_d'/2} e^{\frac{j4\Delta_d}{\lambda k_h} t'} [\delta_d'] dt' \\
 & \left. + \int_{+\pi/2 - \delta_d'/2}^{+\pi/2 + \delta_d'/2} e^{\frac{j4\Delta_d}{\lambda k_h} t'} \left[+ \frac{\pi}{2} - \left(t' - \frac{\delta_d'}{2} \right) \right] dt' \right\}
 \end{aligned} \tag{5.462}$$

$$\begin{aligned}
 A_d(\delta_d) \approx & \left(\frac{\Delta_d}{k_h \pi} \right)^2 e^{\frac{j4\pi}{\lambda} y_0} \left\{ \int_{-\pi/2 - \delta_d'/2}^{-\pi/2 + \delta_d'/2} t' e^{\frac{j4\Delta_d}{\lambda k_h} t'} dt' - \int_{+\pi/2 - \delta_d'/2}^{+\pi/2 + \delta_d'/2} t' e^{\frac{j4\Delta_d}{\lambda k_h} t'} dt' \right. \\
 & + \delta_d' \int_{-\pi/2 + \delta_d'/2}^{+\pi/2 - \delta_d'/2} e^{\frac{j4\Delta_d}{\lambda k_h} t'} dt' \\
 & \left. + \left(\frac{\delta_d'}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \int_{-\pi/2 - \delta_d'/2}^{-\pi/2 + \delta_d'/2} e^{\frac{j4\Delta_d}{\lambda k_h} t'} dt' + \left(\frac{\delta_d'}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \int_{+\pi/2 - \delta_d'/2}^{+\pi/2 + \delta_d'/2} e^{\frac{j4\Delta_d}{\lambda k_h} t'} dt' \right\}
 \end{aligned} \tag{5.463}$$

Dans cette expression, les deux premières intégrales se calculent par parties. Après quelques lignes de calcul, nous obtenons l'expression relativement simple suivante :

$$A_d(\delta_d) \approx - \left(\frac{\Delta_d}{k_h \pi} \right)^2 \left(\frac{\lambda k_h}{4\Delta_d} \right)^2 e^{\frac{j4\pi}{\lambda} y_0} \left(e^{\frac{j2\pi\Delta_d}{\lambda k_h}} - e^{-\frac{j2\pi\Delta_d}{\lambda k_h}} \right) \left(e^{\frac{j2\delta_d'\Delta_d}{\lambda k_h}} - e^{-\frac{j2\delta_d'\Delta_d}{\lambda k_h}} \right) \tag{5.464}$$

En utilisant (5.458), nous obtenons enfin :

$$A_d(\delta_d) \approx \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 e^{\frac{j4\pi}{\lambda} y_0} \sin\left(\frac{2\pi\Delta_d}{\lambda k_h}\right) \sin\left(\frac{2\pi\delta_d}{\lambda}\right) \tag{5.465}$$

Grâce à (5.455) et (5.465), nous pouvons écrire l'expression approchée suivante de l'espérance (5.436) :

$$E[\underline{E}_N] \approx \frac{N}{\delta_d \delta_a} E[a_k] \frac{\Delta_a}{k_h} \delta_a \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 e^{\frac{j4\pi}{\lambda} y_0} \sin\left(\frac{2\pi\Delta_d}{\lambda k_h}\right) \sin\left(\frac{2\pi\delta_d}{\lambda}\right) \tag{5.466}$$

Finalement :

$$E[\underline{E}_N] \approx E[a_k] N \frac{\Delta_a}{k_h \delta_d} \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 e^{\frac{j4\pi}{\lambda} y_0} \sin\left(\frac{2\pi\Delta_d}{\lambda k_h}\right) \sin\left(\frac{2\pi\delta_d}{\lambda}\right) \tag{5.467}$$

6. Bibliographie

- [Adragna 1997] F. Adragna. « Interférométrie radar : principe, applications et limitations ». Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, 148(1997-4):15-19, 1997.
- [Adragna 1998a] F. Adragna. « Interprétation des images radar ». (cours au CNES).
- [Adragna 1998b] F. Adragna. « Interférométrie radar ». (cours au GDTA).
- [Adragna 1998c] F. Adragna. « Radars à synthèse d'ouverture, le traitement de synthèse ». (cours au GDTA).
- [Arnaud 1997] A. Arnaud. « Étude et analyse des artefacts dans la construction de l'image interférométrique radar ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, mars 1997.
- [Bamler 1998] R. Bamler et P. Hartl. « Synthetic Aperture Radar Interferometry ». Inverse Problems, 14:R1-R54, 1998.
- [Bickel 1997] D. L. Bickel, W. H. Hensley et D. A. Yocky. « The Effect of Scattering from Buildings on Interferometric SAR Measurements ». Proceedings of IGARSS'97 (Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development), volume 4, pages 1545-1547, Singapour, août 1997.
- [Boucher 1999] Y. Boucher, H. Cosnefroy, D. Petit, G. Serrot et X. Briottet. « Comparison of Measured and Modeled BDRF of Natural Targets ». Proceedings of the 13rd SPIE Annual International Symposium Aerosense, Orlando, Floride, États-Unis, avril 1999.
- [Bush 1975] T. W. Bush et F. T. Ulaby. « Fading Characteristics of Panchromatic Radar Backscatter from Selected Agricultural Targets ». IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 13(4):149-157, octobre 1975.
- [Costantini 2000] M. Costantini, A. Iodice et L. Pietranera. « Temporal Analysis of Terrain Subsidence by means of Sparse SAR Differential Interferometric Measurements ». Proceedings of EUROPTO 2000, volume 4173 de SPIE proceedings, pages 251-258, Barcelone, Espagne, septembre 2000.
- [Daniel 2000] P. Daniel. « Peut-on extraire le relief d'une seule image ? ». Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, numéro 3669, Toulouse, janvier 2000.
- [Danty 1984] J. Danty. « Laser Speckle and Related Phenomena ». Springer-Verlag, 1984.
- [Descombes 2001] X. Descombes, J.-D. Durou et D. Petit. « Recuit simulé pour le *shape from shading* ». Actes du 18^{ème} colloque GRETSI, pages 513-516, Toulouse, septembre 2001.
- [Dupont 1995] S. Dupont, F. Perlant et M. Berthod. « SAMI: An InSAR Simulator to Improve SAR Calibration ». Proceedings of IGARSS'95 (Quantitative Remote Sensing for Science and Applications), volume 1, pages 559-561, Florence, Italie, juillet 1995.

- [Ferretti 96] A. Ferretti, A. Monti Guarnieri, C. Prati et F. Rocca. « Multi-baseline Interferometric Techniques and Applications ». Proceedings of Fringe 96, Zurich, Suisse, septembre-octobre 1996.
- [Franceschetti 1998] G. Franceschetti, A. Iodice, M. Migliaccio et D. Riccio. « A Novel Across-track SAR Interferometry Simulator ». IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(3):950-962, mai 1998.
- [Fruneau 2000] B. Fruneau et F. Sarti. « Detection of Ground Subsidence in the City of Paris Using Radar Interferometry: Isolation of Deformation from Atmospheric Artifacts Using Correlation ». Geophysical Research Letters, 28:3981-3984, 2000.
- [Gamba 1999] P. Gamba et B. Housmand. « Three Dimensional Urban Characterization by IFSAR Measurements ». Proceedings of IGARSS'99, volume 1, pages 302-304, Hambourg, Allemagne, juin-juillet 1999.
- [Gatelli 1994] F. Gatelli, A. Monti Guarnieri, F. Parizzi, P. Pasquali et C. Prati. « The Wavenumber Shift in SAR Interferometry ». IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32(4):855-865, juillet 1994.
- [Goldstein 1987] R. M. Goldstein et H. A. Zebker. « Interferometric Radar Measurements of Ocean Surface Currents ». Nature, 328(20):707-709, 1987.
- [Goodman 1984] J. W. Goodman. « Laser Speckle and Related Phenomena », chapitre 1 (« Statistical properties of laser speckle patterns »), pages 9-76, Springer-Verlag, 1984.
- [Graham 1974] L. C. Graham. « Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping », volume 62 de Proceedings of the IEEE, pages 763-768, 1974.
- [Grandjean 1999] G. Grandjean. « Présentation informelle au CNES de travaux sur la pénétration des ondes en bande P », 1999.
- [Guglielmi 1995] V. Guglielmi, F. Castanié et P. Piau. « Applications de méthodes super-résolvantes au traitement des données d'un radar à synthèse d'ouverture ». Actes du 15^{ème} colloque GRETSI, pages 1097-1100, Juan-les-Pins, 1995.
- [Imbo 1999] P. Imbo, J.-C. Souyris, A. Lopès et P. Marthon. « Synoptic Representation of the Polarimetric Information ». Proceedings of CEOS (SAR Workshop), pages 341-346, Toulouse, octobre 1999.
- [Kagawa 2000] M. Kagawa et H. Hanaizumi. « Automated Method to Estimate the Baseline Parameters for Deriving the Accurate Digital Elevation Model ». Proceedings of EUROPTO 2000, volume 4173 de SPIE proceedings, pages 211-218, Barcelone, Espagne, septembre 2000.
- [Lacombe 2004] C. Lacombe. « Modèles variationnels et EDP en interférométrie radar RSO ». Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, décembre 2003.
- [Laprade 1963] G. Laprade. « An Analytical and Experiment Study of Stereo for Radar ». Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 29(2):294-300, 1963.

- [Lebedeff 1995] D. Lebedeff. « Étude de la quantification vectorielle des données brutes issues d'un radar à synthèse d'ouverture ». Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 1995.
- [Leberl 1986] F. W. Leberl, G. Dimki, J. Ragam et M. Kobrick. « Radar Stereomapping Techniques and Application to SIR-B Images of Mt Shasta ». IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 24(4):473-481, 1986.
- [Leberl 1990] F. W. Leberl. « Radargrammetric Image Processing ». Artech House, 1990.
- [Lopès 1999] A. Lopès, R. Fjørtoft, D. Ducrot, P. Marthon et C. Lemaréchal. « Segmentation of SAR Images in Homogeneous Regions ». Dans C. H. Chen, éditeur, « Information Processing for Remote Sensing », World Scientific, 1999.
- [Madsen 1993] S. Madsen, H. A. Zebker et J. Martin. « Topographic Mapping Using Radar Interferometry: Processing Techniques ». IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 31(1):246-256, 1993.
- [Madsen 1996] S. N. Madsen, N. Skou, K. Woelders et J. Granholm. « EMISAR Single Pass Topographic SAR Interferometer Modes ». Proceedings of IGARSS'96 (Remote Sensing for a Sustainable Future), volume 1, pages 674-676, Lincoln, Nebraska, États-Unis, mai 1996.
- [Maître 2001] H. Maître. « Traitement des images de RSO ». Hermès, 2001.
- [Massonnet 1985] D. Massonnet. « Interférométrie par radar ». Mémo interne du CNES CT/PF/TI/AS numéro 249, septembre 1985.
- [Massonnet 1993a] D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl et T. Rabaute. « The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry ». Nature, 364(8):138-142, juillet 1993.
- [Massonnet 1993b] D. Massonnet et T. Rabaute. « Radar Interferometry : Limits and Potentials », IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 31(2):455-464, mars 1993.
- [Massonnet 1994] D. Massonnet, K. Feigl, M. Rossi et F. Adragna. « Radar Interferometric Mapping of Deformation in the Year After the Landers Earthquake ». Nature, 369:227-230, 1994.
- [Massonnet 1994a] D. Massonnet, F. Adragna et M. Rossi. « CNES General Purpose SAR Correlator ». IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 32(3):636-664, mai 1994.
- [Massonnet 1995] D. Massonnet, P. Briole et A. Arnaud. « Deflation of Mount Etna Monitored by Spaceborne Radar Interferometry », Nature, 375:567-570, 1995.
- [Massonnet 1996] D. Massonnet, H. Vadon et M. Rossi. « Reduction of the Need for Phase Unwrapping in Radar Interferometry ». IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34(2):489-497, février 1996.
- [Massonnet 1997] D. Massonnet. « Producing Ground Deformation Maps Automatically; the DIAPASON Concept ». Proceedings of IGARSS'97 (Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development), volume 3, pages 1338-1340, Singapour, août 1997.

- [Massonnet 1998] D. Massonnet et K. L. Feigl. « Radar Interferometry and its Application to Changes in the Earth's Surface ». *Review of Geophysics*, 36(4):441- 500, 1998.
- [Monti Guarnieri 1997] A. Monti Guarnieri et C. Prati. « SAR Interferometry : A « quick and dirty » Coherence Estimator for Data Browsing ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3):660-669, mai 1997.
- [Nicolas 1999] J.-M. Nicolas et A. Maruani. « Numerical Mellin Transform Applied to Texture Classification on SAR Images ». *Proceedings of PIERS 1999*, Taipei, Taiwan, mars 1999.
- [Nicolas 2001] J.-M. Nicolas. « Étude de lois de probabilités définies sur R^+ : apport des fonctions caractéristiques et des cumulants de deuxième espèce dans l'étude de mélanges multiplicatifs et additifs ». *Actes du 18^{ème} colloque GRETSI*, Toulouse, septembre 2001.
- [Nocera 1996] L. Nocera. « Reconstruction du relief en imagerie radar à ouverture de synthèse : stéréoscopie et ombrages ». *Thèse de doctorat*, Université Paris 7, 1996.
- [Paquerault 1998] S. Paquerault. « Restitution du relief à partir d'images radar par radarclinométrie ». *Thèse de doctorat*, École Nationale Supérieure des Télécommunications, numéro ENST 98007, Paris, 1998.
- [Pascazio 2000] V. Pascazio, G. Schirrinzi et A. Farina. « Along Track Interferometry by One Bit Coded SAR Signals ». *Proceedings of EUROPTO 2000*, volume 4173 de SPIE proceedings, pages 259-266, Barcelone, Espagne, septembre 2000.
- [Petit 1999] D. Petit et F. Adragna. « A New Interferogram Simulator : 2SIR. Study of Coherence Losses for Tortured Reliefs ». *Proceedings of CEOS (SAR Workshop)*, pages 591-596, Toulouse, octobre 1999.
- [Petit 2000a] D. Petit. « Corrélation spatiale de la phase radar aux hautes résolutions ». *Mémo interne du CNES*, mai 2000.
- [Petit 2000b] D. Petit, F. Adragna et J.-D. Durou. « The Filtering of Layover Areas in High-resolution IFSAR for the Building Extraction ». *Proceedings of EUROPTO 2000*, volume 4173 de SPIE proceedings, pages 230-240, Barcelone, Espagne, septembre 2000.
- [Petit 2001a] D. Petit, L. Soucille, J.-D. Durou et F. Adragna. « Spatial Phase Behaviour in SAR Images ». *Proceedings of EUROPTO 2001*, volume 4543 de SPIE proceedings, pages 53-63, Toulouse, septembre 2001.
- [Petit 2001b] D. Petit, L. Soucille, J.-D. Durou et F. Adragna. « Corrélation spatiale de la phase ». *Actes du 18^{ème} colloque GRETSI*, pages 487-490, Toulouse, septembre 2001.
- [Petit 2001c] D. Petit, J.-D. Durou et F. Adragna. « Détection automatique des repliements en interférométrie radar par analyse de cohérences de pente ». *Actes des journées ORASIS 2001*, pages 173-182, Cahors, juin 2001.
- [Petit 2003] D. Petit. « Synopsis sur les techniques du radar imageur ». (cours du DESS « Ingénierie de l'Image Numérique » de l'Université Paul Sabatier).

- [Polidor 1997] L. Polidori. « Cartographie radar ». Gordon and Breach Science Publishers, 1997.
- [Pottier 1999] E. Pottier et J. S. Lee. « Application of the H/A/ α Polarimetric Decomposition Theorem for Unsupervised Classification of Fully Polarimetric SAR Data Based on Wishart Distribution ». Proceedings of CEOS (SAR Workshop), Toulouse, octobre 1999.
- [Prati 1993] C. Prati et F. Rocca. « Improving Slant Range Resolution of Stationnary Objects with Multiple SAR Surveys ». IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 29:135-144, janvier 1993.
- [Ribbes 1998] F. Ribbes. « Utilisation des données radar pour le suivi des rizières : cartographie, suivi et estimation du rendement ». Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, décembre 1998.
- [Sarti 1998] F. Sarti. « Applications et limitations de l'interférométrie radar : quelques exemples pour le SAR de ERS ». Rapport de stage du DESS « Télédétection et Imagerie Numérique » de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1998.
- [Sarti 1999] F. Sarti, F. Adragna, N. Pourthié, B. Rosich-Tell, A. Arnaud, K. Feigl, M. Rosengren, P. Imbo et D. Petit. « Preliminary Results of an InSAR Analysis of the Effects of the Izmit Earthquake ». Proceedings of CEOS (SAR Workshop), Toulouse, octobre 1999.
- [She 1999] Z. She, D. A. Gray et R. E. Bogner. « Three-dimensional Synthetic Aperture Radar (SAR) Imaging via Multiple Pass Processing ». Proceedings of IGARSS'99, pages 2389-2391, Hambourg, Allemagne, juin-juillet 1999.
- [Simonetto 2002a] E. Simonetto. « Extraction 3-D de structures industrielles sur des images RAMSES haute résolution par radargrammétrie ». Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, avril 2002.
- [Simonetto 2002b] E. Simonetto, H. Oriot et R. Garelo. « Extraction 3D de structures industrielles par radargrammétrie haute résolution ». Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, 166(2002-2):53-63, 2002
- [Touzi 1996] R. Touzi, A. Lopès, J. Bruniquel et P. Vachon. « Unbiaised Estimation of the Coherence from Multi-look SAR Data ». Proceedings of IGARSS'96 (Remote Sensing for a Sustainable Future), volume 1, pages 662-664, Lincoln, Nebraska, États-Unis, 1996.
- [Touzi 1998] R. Touzi. « Estimation of Stationary and Non -stationary Coherence in SAR Imagery ». Proceedings of IGARSS'98 (Sensing and Managing the Environment), volume 5, pages 2659-2661, Seattle, Washington, États-Unis.
- [Touzi 1999] R. Touzi, A. Lopès, J. Bruniquel et P. Vachon. « Coherence Estimation for SAR Imagery ». IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37(1):135-149, janvier 1999.
- [Trouvé 1996] E. Trouvé. « Imagerie interférentielle en radar à ouverture synthétique ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, juillet 1996.
- [Ulaby 1989] F. T. Ulaby et M. C. Dobson. « Handbook of Radar Scattering for Terrain », Artech House, 1989.

- [Van Zyl 1989] J. Van Zyl. « Unsupervised Classification of Scattering Behaviour Using Radar Polarimetry Data ». IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 27(1):36-45, 1989.
- [Wildey 1986] R. L. Wildey. « Radarclinometry for the Venus Radar Mapper ». Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52(1):41-50, 1986.
- [Wilkinson 1999] A. J. Wilkinson. « Synthetic Aperture Radar Interferometry: A Statistical Model for Layover Areas ». Proceedings of IGARSS'99, volume 5, pages 2392-2394, Hambourg, Allemagne, juin-juillet 1999.
- [Xu 94] W. Xu, E. C. Chang, L. K. Kwoh, H. Lim et A. Heng. « Phase-unwrapping of SAR Interferogram with Multi-frequency or Multi-baseline ». Proceedings of IGARSS'94, pages 730-732, Pasadena, États-Unis, août 1994.
- [Zong-Guo 1996] X. Zong-Guo et S. Yongwei. « Radar Speckle: Noise or Information? ». Proceedings of IGARSS'96 (Remote Sensing for a Sustainable Future), volume 1, pages 48-50, Lincoln, Nebraska, États-Unis, 1996.

7. Index

7.1 Index des figures

Figure 1-1. <i>Convention d'orientation des images radar (sauf mention contraire).</i>	18
Figure 1-1. <i>Radar à visée latérale.</i>	22
Figure 1-2. <i>Synoptique de l'instrument radar : l'amplitude du signal reçu est échantillonné.</i>	23
Figure 1-3. <i>Résolution d'un système radar.</i>	24
Figure 1-4. <i>Projection du diagramme d'antenne au sol.</i>	25
Figure 1-5. <i>Distance minimale entre deux cibles ponctuelles.</i>	26
Figure 1-6. <i>Synoptique de l'instrument radar : I et Q désignent les signaux échantillonnés, respectivement les parties réelle et imaginaire du signal complexe.</i>	26
Figure 1-7. <i>Principe du filtrage adapté ou de la compression d'impulsion.</i>	28
Figure 1-8. <i>Recouvrement des lobes d'illumination.</i>	29
Figure 1-9. <i>Antenne virtuelle équivalente.</i>	30
Figure 1-10. <i>Domaine fréquentiel radar.</i>	32
Figure 1-11. <i>Exemple de traitement de synthèse radar (données RadarSat, Montréal).</i>	33
Figure 1-12. <i>Exemple d'histogramme de l'amplitude d'une image radar.</i>	37
Figure 1-13. <i>Le chatolement sur une image radar (AeroSensing, bande X) : champ à proximité des villages de Biblisheim et Walbourg (France).</i>	37
Figure 1-14. <i>Schéma de coin réflecteur.</i>	38
Figure 1-15. <i>Double rebond et ombre portée dus à un bâtiment.</i>	39
Figure 1-16. <i>Simulations d'images d'un modèle numérique de terrain obtenues avec 2SIR.</i> .	41
Figure 1-17. <i>Simulations d'images d'une carrière obtenues avec 2SIR.</i>	41
Figure 1-18. <i>Cibles projetées en géométrie radar.</i>	42
Figure 1-19. <i>Analogie entre système radar et système optique.</i>	42
Figure 1-20. <i>Exemple de repliement et de masquage dus à des arbres.</i>	43
Figure 1-21. <i>Illustration des phénomènes de repliement et de masquage pour des arbres.</i>	43
Figure 1-22. <i>Géométrie d'acquisition pour la radargrammétrie dans le cadre de la configuration la plus simple : deux trajectoires parallèles situées du même côté de la scène et de même altitude.</i>	44
Figure 1-23. <i>Reconstruction du relief par radarclinométrie (le relief reconstruit provient de la thèse de Pascal Daniel [Daniel 2000]).</i>	46
Figure 1-24. <i>Les deux composantes d'une image radar (AeroSensing, bande X).</i>	48
Figure 1-25. <i>Illustration des différents termes de phase.</i>	49
Figure 1-26. <i>Illustration de la phase de construction du pixel.</i>	50
Figure 1-27. <i>Image radar, interférogramme et cohérence obtenues à partir d'un couple d'images RAMSES.</i>	54
Figure 1-28. <i>Mesure de déplacement du sol par interférométrie différentielle.</i>	55

Figure 1-29. <i>Franges interférométriques produites par un mouvement de terrain :</i>	56
Figure 1-30. <i>Différence de distance entre deux capteurs interférométriques et un point au sol, dans un repère cartésien.</i>	57
Figure 1-31. <i>Localisation dans l'espace d'une cible ponctuelle par interférométrie radar.</i> ...	58
Figure 1-32. <i>Franges interférométriques produites par un relief situé au sud d'Albuquerque, en Arizona (mission SRTM, NASA, JPL) : image d'amplitude et interférogramme.</i>	59
Figure 1-33. <i>Déroutement de la phase sur un relief.</i>	61
Figure 1-34. <i>Différence de distance entre un émetteur et une cible M au sein d'un pixel P, et entre cette même cible et un récepteur, pour une acquisition : $\vec{R}_a = \vec{R}_b$ dans le cas monostatique et $\vec{R}_a \neq \vec{R}_b$ dans le cas bistatique.</i>	63
Figure 1-35. <i>Relations entre les différents angles impliqués dans des conditions interférométriques en un point M appartenant à un pixel dont le centre est P.</i>	67
Figure 1-36. <i>Décalage de la réponse spectrale du sol selon les conditions d'acquisition.</i>	68
Figure 1-37. <i>Variations de la différence de distance $R_2 - R_1$ en fonction de l'angle d'incidence θ.</i>	70
Figure 1-38. <i>Courbe de variation de la différence de distance $R_2 - R_1$, en pourcentage de la ligne de base b, en fonction de l'angle d'indicence θ (cas où $\alpha_b = 0$).</i>	70
Figure 1-39. <i>Déroutement des franges interférométriques et reconstruction du relief :</i>	74
Figure 1-40. <i>Variations d'altitude et d'angle pour un petit déplacement en distance.</i>	75
Figure 1-41. <i>Simulation de franges interférométriques sur un relief, produite par 2SIR (dans un cas idéal où il n'y a ni décalage entre les images interférométriques ni décorrélation angulaire). Le radar bistatique a une trajectoire de gauche à droite, en bas de l'image.</i>	78
Figure 1-42. <i>Écart géométrique introduit par la rotondité terrestre dans la reconstruction du relief par interférométrie radar.</i>	80
Figure 2-1. <i>Simulation de la réponse d'une cible ponctuelle dans un fouillis.</i>	84
Figure 2-2. <i>Exemples de fonctions de pondération.</i>	85
Figure 2-3. <i>Simulation de l'amplitude d'une source ponctuelle avant et après pondération.</i> .	86
Figure 2-4. <i>Profils de l'amplitude de la réponse d'une cible ponctuelle avant et après pondération (simulations).</i>	86
Figure 2-5. <i>Amplitude du spectre des données réelles (AeS et RAMSES) à haute résolution traitées.</i>	89
Figure 2-6. <i>Histogrammes de l'amplitude et loi de Rayleigh ajustée aux données pour quatre images (Aerosensing).</i>	90
Figure 2-7. <i>Histogrammes de l'amplitude et loi de Rayleigh ajustée aux données. Afin d'étudier la statistique du speckle, deux masques ont été appliqués à l'image b pour différencier les éléments de bâtiments de radiométrie élevée (image c) de ceux des zones d'ombre (image d).</i>	90
Figure 2-8. <i>Simulation de l'image d'un arbre dans un champ aux propriétés stationnaires (rugosité, diélectricité), pour $\Delta = 2,25 \lambda$ et un sur-échantillonnage d'un facteur 2 par zéro-padding (technique qui consiste à élargir artificiellement le spectre en ajoutant des zéros de chaque côté).</i>	91
Figure 2-9. <i>Traverse métallique sur une image à haute résolution.</i>	92

Figure 2-10. Évolution de la corrélation de la phase sur une image de phase aléatoire, pondérée en fréquence de manière identique aux données réelles (cf. figure 2-5), en fonction du nombre d'échantillons.	95
Figure 2-11. Représentation « 3D » de la fonction d'autocorrélation calculée sur une image simulée et sur une image réelle.	96
Figure 2-12. Exemple d'objet étendu présentant une forte corrélation de la phase (objet non identifié et intitulé « Brillant750 » sur une image RAMSES).	97
Figure 2-13. Exemple d'objet étendu présentant une forte corrélation de la phase (objet non identifié et intitulé « Brillant2420 » sur une image RAMSES).	97
Figure 2-14. Comportement de la phase sur des murs d'une aciérie (image RAMSES).	98
Figure 2-15. Comportement de la phase dans le cas d'une grue métallique.	98
Figure 2-16. Comportement de la phase dans le cas d'un wagon.	98
Figure 2-17. Comportement de la phase sur une traverse métallique. Il s'agit de la traverse métallique précédemment identifiée (cf. figure 2-9).	99
Figure 2-18. Comportement de la phase dans une zone d'ombre.	99
Figure 2-19. Comportement de la phase dans le cas d'un artéfact. Il s'agit d'une image fantôme d'un objet à forte radiométrie, observé dans un lobe secondaire de l'antenne.	100
Figure 2-20. La réponse mesurée au sein d'un pixel est modélisée à partir d'une somme de réponses impulsionnelles.	101
Figure 2-21. Fonction H obtenue selon la pondération spectrale de la réponse impulsionnelle.	105
Figure 2-22. Exemple de motif périodique.	106
Figure 2-23. Représentation en niveaux de gris des modulations de la corrélation de la phase dans le cas du modèle théorique de Goodman étendu. Ces variations sont étudiées en fonction des rapports entre pas de pixel et longueur d'onde et entre pas de pixel et résolution.	107
Figure 2-24. Corrélation de la phase pour le modèle théorique. Les estimateurs γ_Φ et γ_A sont représentés respectivement par la courbe bleue continue et la courbe verte discontinue.	108
Figure 2-25. Corrélation de la phase dans le cas où la réponse impulsionnelle est pondérée spectralement par une fonction de Hamming. Les estimateurs γ_Φ et γ_A sont représentés respectivement par la courbe bleue continue et la courbe verte discontinue.	109
Figure 3-1. Géométrie d'acquisition des simulations réalisées avec 2SIR pour étudier les variations de la cohérence en fonction de l'angle d'incidence et de la pente du sol.	112
Figure 3-2. Variations de la cohérence mesurée sur des simulations, en fonction de l'angle local d'incidence et de la ligne de base orthogonale.	114
Figure 3-3. Géométries du repliement pour l'étude de la variation de la cohérence.	115
Figure 3-4. Évolution de la cohérence selon les paramètres du repliement.	116
Figure 3-5. Filtrage de signaux dont les réponses spectrales sont décalées dans le but de faire de l'interférométrie de pente.	117
Figure 3-6. Génération d'un interférogramme de pente à partir de sous-interférogrammes générés par sélection de pente.	118
Figure 3-7. Sommation de tous les sous-interférogrammes complexes en représentation de Fresnel.	119

Figure 3-8. Cohérence de pente en fonction du décalage spectral Δf , exprimé en pourcentage de la bande passante B , pour deux pentes (cf. tableau 3-3).....	121
Figure 3-9. Cohérence en fonction du décalage spectral Δf , exprimé en pourcentage de la bande passante B , avec soustraction des franges résiduelles, dans le cas de la pente de 75 degrés.	121
Figure 3-10. Cohérence en fonction du décalage spectral Δf , exprimé en pourcentage de la bande passante B , dans le cas de deux pentes formant une zone de repliement.	123
Figure 3-11. Évolution des valeurs maximales des pics de la cohérence en fonction de la largeur de bande B_s (exprimée en % de B).	123
Figure 3-12. Évolution du rapport signal sur bruit (en dB) des valeurs maximales des pics de la cohérence, en fonction de la largeur de bande B_s (exprimée en % de B).	124
Figure 3-13. Modèle « 2D » d'un bâtiment et son interférogramme simulé par 2SIR.....	129
Figure 3-14. Modèle « 2D » d'une rampe et son interférogramme simulé par 2SIR.....	130
Figure 3-15. Cohérences de pente mesurées.	130
Figure 3-16. Étape 1 de la méthode RIP appliquée à une zone de repliement. La phase est déroulée sur l'interférogramme I_h , tant que la cohérence C_v est inférieure à un seuil V	131
Figure 3-17. Étape 2 de la méthode RIP appliquée à une zone de repliement. Nous entrons dans une zone de repliement, mais la phase continue à être déroulée sur l'interférogramme I_h , jusqu'à ce que la cohérence C_v redescende au dessous du seuil V	131
Figure 3-18. Étape 3 de la méthode RIP appliquée à une zone de repliement. La phase est ensuite déroulée sur l'interférogramme I_v , dans le sens décroissant de la distance, puisque cette surface est en repliement, jusqu'à atteindre le début de la zone de repliement.	132
Figure 3-19. Étape 4 de la méthode RIP appliquée à une zone de repliement. De nouveau, la phase est déroulée sur l'interférogramme I_h jusqu'à la fin de la zone de repliement. La forme de la surface reconstruite sur le sommet est donc identique à celle reconstruite devant le bâtiment. Pour différencier ces surfaces, il serait nécessaire que leurs pentes soient différentes. Dans ce cas, une troisième interférométrie de pente devrait être réalisée.	132
Figure 3-20. Étape 1-bis de la méthode RIP appliquée à une zone de repliement. Le déroulement de phase est repris de manière identique à l'étape 1, depuis la fin du repliement.	132
Figure 3-21. Reconstruction « 3D » d'un modèle de bâtiment et d'une rampe, dans le cas d'une méthode classique de reconstruction par interférométrie radar.	134
Figure 3-22. Résultats de la RIP pour différents décalages spectraux, sur un modèle de bâtiment.	135
Figure 3-23. Effets du décalage spectral (et donc de la ligne de base) sur la qualité de la reconstruction « 3D » et sur le seuil de détection du repliement.	135
Figure 3-24. Exemples de reconstructions pour différents décalages spectraux.	136
Figure 3-25. Vue « 3D » d'une reconstruction de bâtiment dans le cas d'une simulation où les phénomènes de double rebond ont été pris en compte et pour un décalage spectral égal à seulement 3,5% de B	137

Figure 4-1. <i>Vue « 3D » en fausses couleurs du relief d'une lisière de forêt près de Haguenau, reconstruit par interférométrie radar par la société Aerosensing (capteur AeS bande X, droits CNES).</i>	141
Figure 4-2. <i>Projection radar de bâtiments.</i>	142
Figure 4-3. <i>Amplitude radar et phase interférométrique mesurées sur une zone urbaine (quartier3).</i>	142
Figure 4-4. <i>Différentes représentations du signal interférométrique, de l'amplitude, de la cohérence et de la corrélation spatiale de la phase d'une zone urbaine (quartier3).</i> ...	143
Figure 4-5. <i>Reconstruction « 3D » d'un bâtiment présentant une déformation due aux doubles rebonds sur sa façade (extrait du quartier1).</i>	144
Figure 4-6. <i>Exemple d'image radar d'une zone urbaine (quartier2).</i>	145
Figure 4-7. <i>Carte IGN du quartier2.</i>	145
Figure 4-8. <i>Image radar et interférogramme du quartier1.</i>	146
Figure 4-9. <i>Image Ikonos (résolution de 3 mètres) du quartier1.</i>	146
Figure 4-10. <i>Carte IGN du quartier1.</i>	146
Figure 4-11. <i>Amplitude de l'image radar de l'extrait du quartier1.</i>	147
Figure 4-12. <i>Photographies correspondant à l'extrait du quartier1.</i>	147
Figure 4-13. <i>Extrait de carte IGN correspondant à l'extrait du quartier1.</i>	148
Figure 4-14. <i>Vue « 3D » d'un MNS réalisé par interférométrie radar sur l'extrait du quartier1.</i>	148
Figure 4-15. <i>Exemples de fonctions d'appartenance floues. Le domaine de variation de la donnée d'entrée a été choisi identique à celui de sortie : $[0,1]$. Les paramètres choisis sont $\mu_d = 0,1$, $\mu_s = 0,3$ et $\mu_f = 0,8$.</i>	150
Figure 4-16. <i>Exemple de classification des éléments de la scène (cf. figure 4-11) obtenue à partir de la classification floue (extrait du quartier1).</i>	159
Figure 4-17. <i>Exemple de reconstruction « 3D » optimisée de la zone semi-urbaine (cf. figure 4-11, extrait du quartier1) obtenue à partir de la classification présentée sur la figure 4-16.</i>	159
Figure 4-18. <i>Panorama de photographies de la zone d'étude (extrait du quartier1).</i>	160
Figure 5-1. <i>Intensité d'une source ponctuelle.</i>	164
Figure 5-2. <i>Luminance énergétique.</i>	164
Figure 5-3. <i>Exemple d'ouverture plane rectangulaire.</i>	168
Figure 5-4. <i>Diagramme de rayonnement d'une ouverture plane en fonction de θ, dans le plan $\phi = 0$.</i>	171
Figure 5-5. <i>Géométrie d'observation d'un pixel par le radar.</i>	173
Figure 5-6. <i>Géométrie d'acquisition dans un repère sol.</i>	177
Figure 5-7. <i>Exemple de modèle de rétrodiffusion employé par 2SIR (la capture d'écran a été réalisée sous le logiciel TISER développé par CS, qui met en œuvre les principes du simulateur 2SIR).</i>	180
Figure 5-8. <i>Facette.</i>	181
Figure 5-9. <i>Cylindre creux.</i>	182
Figure 5-10. <i>Triangle.</i>	182
Figure 5-11. <i>Parallélépipède.</i>	182

Figure 5-12. <i>Ellipsoïde de révolution</i>	183
Figure 5-13. <i>Distributions de cibles ponctuelles</i>	184
Figure 5-14. <i>Étapes de la simulation</i>	185
Figure 5-15. <i>Exemples de double et triple rebonds</i>	185
Figure 5-16. <i>Différence de distance entre les points A, B et O</i>	187

7.2 Index des tableaux

Tableau 1-1. <i>Bandes radar.</i>	34
Tableau 1-2. <i>Types de coefficients de rétrodiffusion.</i>	36
Tableau 1-3. <i>Exemples de coefficients de rétrodiffusion pour différentes surfaces.</i>	36
Tableau 1-4. <i>Décomposition de la phase radar.</i>	48
Tableau 2-1. <i>Coefficient de pondération associé à chaque type de réponse impulsionnelle.</i> ..	87
Tableau 2-2. <i>Principaux capteurs ROS et leurs résolutions.</i>	88
Tableau 2-3. <i>Rappel des valeurs de k_h selon la pondération (cf. tableau 2-1).</i>	105
Tableau 3-1. <i>Paramètres de simulation pour les mesures de cohérence.</i>	113
Tableau 3-2. <i>Paramètres de simulation pour la détection de pente par mesure de la cohérence de pente sur une fenêtre d'estimation.</i>	120
Tableau 3-3. <i>Comparaison entre les décalages fréquentiels mesurés et attendus.</i>	121
Tableau 3-4. <i>Comparaison entre les décalages fréquentiels mesurés et attendus, dans le cas de deux pentes formant une zone de repliement.</i>	122
Tableau 3-5. <i>Paramètres employés par 2SIR pour la simulation de la réponse interférométrique d'un modèle de bâtiment.</i>	133
Tableau 4-1. <i>Conditions d'acquisition des données RAMSES.</i>	139
Tableau 4-2. <i>Conditions d'acquisition des données AeS.</i>	140

7.3 Index des mots clés

aéroporté.....	88	modèle de phase.....	101
along track.....	22	monostatique.....	40, 51
altitude d'ambiguïté.....	127	paradoxe interférométrique.....	69
artéfacts.....	99	pas.....	23
atmosphérique.....	49	pas d'échantillonnage.....	24
azimut.....	22	pas de pixel.....	23, 24
bistatique.....	51	phase atmosphérique.....	48
bruit de phase.....	48, 49	phase de construction.....	48, 49
chatoiement.....	37	phase de rétrodiffusion.....	48, 49
chirp.....	29	phase de synthèse.....	48
coefficient de rétrodiffusion.....	35	phase de trajet.....	48, 49
cohérence.....	53, 111	phase instrumentale.....	48, 49
cohérences de pente.....	119	phase radar.....	47
coins réflecteurs.....	38	pondération du spectre.....	84
corrélation spatiale.....	94	portée distale.....	22
cross track.....	22	postulats de l'interférométrie.....	50
décorrélacion angulaire.....	68	PRF.....	23
déroulement des franges.....	73	radarclinométrie.....	45
distance.....	22	radargrammétrie.....	43
distance proximale.....	22	Rayleigh.....	38
données brutes.....	31	repliement.....	40
données synthétisées.....	31	résolution.....	24, 28, 84
fauchée.....	22	résolution en azimut.....	25, 31
Fe.....	23, 27	résolution en distance.....	25, 26
filtrage adaptatif.....	86	RIP.....	127
filtrage adapté.....	27	RIP " 2D ".....	129
foreshortening.....	41	satellite.....	87
fréquence d'échantillonnage.....	23, 27	sélection de pente.....	116
FRI.....	23	séparabilité.....	125
interférogramme.....	53	séparabilité en fréquence.....	125
interférométrie de pente.....	118	shape from shading.....	45
interférométrie différentielle.....	54	SHF.....	32
interférométrie stéréoscopique.....	56	speckle.....	37
layover.....	40	système d'acquisition.....	26
migration.....	31	UHF.....	32
modèle de Goodman.....	100		

AUTHOR: David PETIT

TITLE: “3D” extraction using high resolution radar interferometry

READER: Jean-Denis DUROU

PLACE AND DATE OF PRESENTATION: January 12st 2004 IRIT (Toulouse)

SUMMARY:

Since few years, interferometry radar has largely highlighted its aptitude to measure low displacements of the ground, or to recreate Digital Elevation Models (DEM). However, the use of interferometric techniques for high resolutions, in particular in urban environment, is the trickiest. Indeed, the geometrical characteristics of a radar acquisition and the properties of the radar wave create ambiguities in the interferometric signal.

Initially, an approach by simulation was adopted, in order to study the impact of the phenomena brought into play, and to test the techniques likely to raise ambiguities, under perfectly controlled conditions. Thus, works on radar high resolution highlighted cases of the spatial correlation of phase on real and simulated data. A proposal for a modeling of the phenomenon was carried out, and we showed the implications within the framework of interferometric processing. We then studied the possibility of an optimal processing of the layover areas for the “3D” rebuilding with simulated data, thanks to techniques of frequential filtering. Finally, we underlined the interest of a rebuilding adapted to considered objects, thanks to a fuzzy classification based on the whole information extracted from the image.

KEY WORDS:

3D	SAR	Interferometry	High resolution
Layover	DEM	Fuzzy logic	Urban

ADMINISTRATIVE DISCIPLINE:

Image and Data Processing

NAME AND ADDRESS OF THE UNIVERSITY OR LABORATORY:

Université de Toulouse III – Paul Sabatier,

118 route de Narbonne 31 062 Toulouse Cedex 4